

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



CÁLCULO Y DISEÑO DE UN BOBINADO PARA LA MAGNETIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO MAGNETOREOLÓGICO

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor :

Oscar Daniel Suquillo Muzo

Tutor :

Alejandro Martín Clemente

Leganés, Marzo 2014.

Título: CÁLCULO Y DISEÑO DE UN BOBINADO PARA LA MAGNETIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO MAGNETOREOLÓGICO

Autor: Oscar Daniel Suquillo Muzo.

Profesor: Alejandro Martín Clemente.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 11 de Marzo de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

Agradecimientos.

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente proyecto, en especial a Alejandro Martín Clemente ya que sin su ayuda, no habría sido posible la realización del mismo.

Quisiera también agradecer a los compañeros de la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid por compartir conmigo durante estos años un camino común de aprendizaje hacia un futuro ingenieril.

No quisiera olvidarme de mi madre, mi novia, mi hijo y mi familia que siempre me ofrecieron la comprensión, paciencia y el ánimo que necesitaba. A todos ellos, muchas gracias.

Resumen.

Este proyecto está orientado a la simulación de una bobina capaz de crear el campo magnético necesario para el funcionamiento de un embrague que forma parte de un mecanismo para la rehabilitación de las extremidades superiores. Se han realizado varios modelos en dos y tres dimensiones para estudiar el comportamiento con distintos materiales. El objetivo de este trabajo es ofrecer una solución viable para su construcción y también alguna alternativa de diseño.

Abstract.

This project is aimed at simulating a coil capable of creating the magnetic field necessary for the operation of a clutch that is part of a mechanism for the rehabilitation of upper extremity. There have been several models in two and three dimensions to study the behavior of different materials. The aim of this project is to provide a viable solution for their construction and provide a design alternative.

Estructura de la memoria.

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de los capítulos.

- El capítulo uno contiene la introducción y los objetivos.
- El capítulo dos hace referencia a los conceptos teóricos aplicados.
- En el capítulo tres buscamos el simulador más adecuado para nuestro trabajo.
- El capítulo cuatro muestra la geometría de los modelos previos y finales del mecanismo.
- En el capítulo cinco se estudia el comportamiento de ciertos materiales en presencia del campo magnético.
- En el capítulo seis se diseña la bobina y se muestran las simulaciones en el modelo final.
- El capítulo siete ofrece una alternativa de diseño utilizando un electroimán.
- El capítulo ocho se muestran los resultados, conclusiones y líneas futuras de trabajo.
- Los planos del embrague, las guías de diseño de circuitos magnéticos y las hojas características del fluido magnetoreológico se adjuntan como anexos.

Índice General.

| | |
|---|--------------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 2 |
| CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 3 |
| 2.1 Fluidos Magnetoreológicos..... | 3 |
| 2.1.1 Tipos de Fluidos..... | 3 |
| 2.1.1.1 Fluidos Newtonianos..... | 4 |
| 2.1.1.2 Fluidos No Newtonianos..... | 5 |
| 2.1.1.3 Fluidos Viscoelásticos..... | 6 |
| 2.1.2 Fluidos Magnetoreológicos..... | 6 |
| 2.1.3 Modelado del Fluido Magnetoreológico..... | 7 |
| 2.1.4 Propiedades físico-químicas..... | 9 |
| 2.1.4.1 Propiedades reológicas..... | 9 |
| 2.1.4.2 Propiedades magnéticas..... | 9 |
| 2.2 Campo Magnético..... | 11 |
| 2.2.1 Fuerza ejercida por un campo magnético..... | 11 |
| 2.2.2 Fuentes del campo magnético..... | 12 |
| 2.2.2.1 Campo magnético B debido a una corriente en un solenoide..... | 13 |
| 2.2.3 Inducción Magnética..... | 15 |
| 2.2.4 Campo magnético H, imanación M, y permeabilidad μ | 16 |
| 2.2.5 Propiedades magnéticas de los materiales..... | 18 |
| 2.2.5.1 Tipos de magnetismo..... | 19 |
| 2.2.6 Electroimanes..... | 20 |

| | |
|---|---------------|
| CAPÍTULO 3. SOFTWARE Y SIMULACIÓN..... | 21 |
| 3.1 MagCAD..... | 21 |
| 3.2 Magnet..... | 22 |
| 3.3 ANSYS Maxwell. | 23 |
| 3.4 Elección de la herramienta de simulación..... | 24 |
| 3.5 Tutorial ANSYS Maxwell Versión 16.0 | 24 |
| 3.5.1 Configuración del Diseño. | 25 |
| 3.5.1.1 Abrir Maxwell y guardar un Nuevo Proyecto..... | 25 |
| 3.5.1.2 Especificar el Tipo de Solución. | 28 |
| 3.5.1.3 Configuración de unidades..... | 28 |
| 3.5.2 Modelado Geométrico. | 29 |
| 3.5.3 Asignar materiales a los objetos..... | 30 |
| 3.5.4 Asignar Límites y Excitaciones. | 31 |
| 3.5.5 Configuración y Ejecución de un Análisis. | 33 |
| 3.5.6 Importación de archivos a ANSYS Maxwell. | 34 |
| CAPÍTULO 4. GEOMETRÍA DEL EMBRAGUE..... | 37 |
| 4.1 Modelos previos de la Geometría del Embrague. 2D. | 38 |
| 4.2 Modelos previos de la Geometría del Embrague. 3D. | 39 |
| 4.3 Importación de la Geometría real del Embrague..... | 41 |
| 4.3.1 Carcasas Superior e Inferior. | 42 |
| 4.3.2 Eje de Entrada. | 42 |
| 4.3.3 Eje de Salida. | 43 |
| 4.3.4 Tapa eje de Salida..... | 43 |
| 4.3.5 Geometría del Embrague Completo. | 44 |
| 4.3.6 Funcionamiento del mecanismo completo. | 45 |
| CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE MATERIALES. SIMULACIONES..... | 46 |
| 5.1 Modelos previos de la geometría del embrague. 2D. | 46 |
| 5.1.1 Cálculos previos..... | 46 |
| 5.1.2 Simulaciones con aire..... | 48 |
| 5.1.3 Simulaciones con aluminio..... | 50 |
| 5.1.4 Simulaciones con hierro | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2 Modelos previos de la geometría del embrague. 3D. | 57 |
| 5.2.1 Cálculos previos. | 57 |
| 5.2.2 Simulaciones con aluminio en 3D. | 58 |
| 5.3 Importación de la geometría real construida. | 61 |
| CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA BOBINA. SIMULACIONES. | 64 |
| 6.1 Limitaciones geométricas. | 64 |
| 6.2 Punto de trabajo del fluido MR. | 66 |
| 6.3 Cálculos teóricos del bobinado. | 67 |
| 6.4 Bobina final. | 69 |
| 6.5 Simulaciones de todo el conjunto. | 71 |
| 6.5.1 Simulaciones del embrague con sus componentes contruidos con aluminio. | 71 |
| 6.5.2 Simulaciones del embrague con sus componentes contruidos con hierro. | 73 |
| 6.6 Resultados. | 75 |
| CAPÍTULO 7. PROPUESTA DE DISEÑO UTILIZANDO UN ELECTROIMÁN. | 76 |
| 7.1 Diseño del circuito magnético. | 76 |
| 7.2 Simulaciones del con el electroimán como fuente de campo magnético. | 79 |
| 7.3 Resultados. | 80 |
| CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE TRABAJO. | 81 |
| 8.1 Resultados. | 81 |
| 8.2 Conclusiones. | 82 |
| 8.3 Trabajos futuros. | 82 |
| BIBLIOGRAFÍA. | 84 |
| ANEXOS. | 85 |
| Anexo 1. Hojas características del fluido MR (Lord Technical Data). | 85 |
| Anexo 2. Planos del embrague. | 85 |
| Anexo 3. Guía de diseño (Magnetic Circuit Design). | 85 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1 Introducción.

Un Exoesqueleto es una estructura fija con articulaciones, que transmite el par desde los actuadores hasta las extremidades humanas. El uso de este tipo de dispositivos para la rehabilitación permite a los pacientes recuperar o mejorar las capacidades funcionales y motrices.

El uso de tecnologías como los robots industriales para la rehabilitación, ha demostrado ser una mala solución para los pacientes en términos de pacientes en términos de aceptabilidad, utilidad, seguridad y fiabilidad.

Las contracciones musculares que se producen de forma involuntaria hacen que la estrategia de control sea demasiado complejo para actuadores clásicos. Los espasmos son realmente peligrosos cuando su control lo lleva un robot médico, debido a las inercias de los actuadores y al tiempo de ejecución de las órdenes.

Aparte de estos requisitos, el peso y las dimensiones de un dispositivo, que trabaja en un exoesqueleto, debe ser lo más ligero y pequeño como sea posible.

Estas limitaciones hacen que el diseño de los actuadores sea un problema difícil de resolver, resultando ser un auténtico desafío para los ingenieros encargados de buscar diseños óptimos en el campo de la biomedicina.

Los fluidos magnetoreológicos tienen partículas de un tamaño del orden de unas pocas micras en un portador líquido. Cambian su viscosidad al instante cuando se encuentran en presencia de un campo magnético, mediante la formación columnar de estructuras paralelas a la misma. Estas estructuras en forma de cadena restringen el movimiento del fluido, aumentando de este modo la viscosa características de la suspensión.

El uso de un fluido como un medio de transmisión en actuadores, permite la liberación de las articulaciones al instante. De este modo, el tiempo de respuesta del embrague frente a cambios de campos magnéticos aplicados, es uno de los principales motivos que nos llevan al estudio de esta tecnología.

1.2 Objetivos.

Este proyecto tiene varios objetivos que se pretenden alcanzar. Siendo el más importante el ofrecer una solución al diseño de la fuente de campo magnético necesaria para la el correcto funcionamiento del fluido magnetoreológico cuando este sometido al campo. El embrague está construido, y por ello cobra gran importancia la solución planteada ya que, de ser viable, se estudiaría su posible construcción.

Otro objetivo planteado es la búsqueda de un simulador capaz de permitirnos este estudio, ya que en los años de carrera que se han cursado, no se ha utilizado este tipo de software. Tendremos que adquirir destreza y facilidad en el uso del programa para lograr obtener simulaciones y resultados fiables.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1 Fluidos Magnetoreológicos.

2.1.1 Tipos de Fluidos.

Antes de centrarnos en la descripción y características de los fluidos magnetoreológicos, debemos primero conocer los tipos de fluidos convencionales y el avance de la tecnología en el campo de los materiales para la construcción de dispositivos, y de este modo, tener una amplia visión de las aplicaciones en las diferentes áreas.

Los fluidos se clasifican en:

- Fluidos Newtonianos.
- Fluidos No-Newtonianos.
- Fluidos Viscoelásticos.

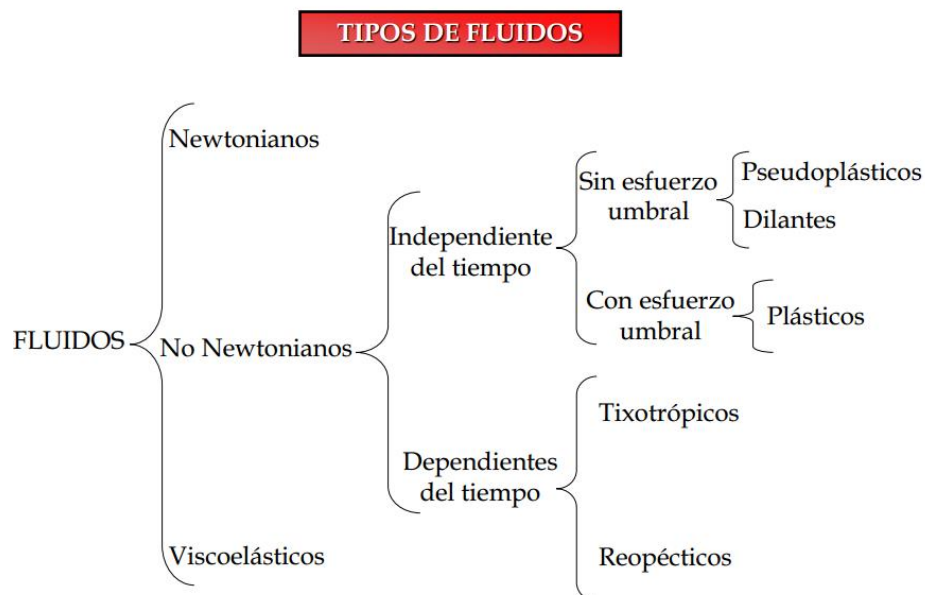


Figura 2.1 Tipos de Fluidos [1].

2.1.1.1 Fluidos Newtonianos.

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton para fluidos, es decir que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante τ y la velocidad de deformación $\partial V/\partial n$. Por ejemplo si se duplica el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación también se duplicará. [1] Esto se debe a que la viscosidad μ se mantiene constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado.

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial n}$$

Hay que tener en cuenta que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación de esfuerzo, aunque si puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Estos tipos de fluidos se representan con dos tipos de gráficas, la “curva de fluidez” y la “curva de viscosidad”.

En la curva de fluidez se estudia la velocidad de deformación en función del esfuerzo cortante, mientras que en la curva de viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación.

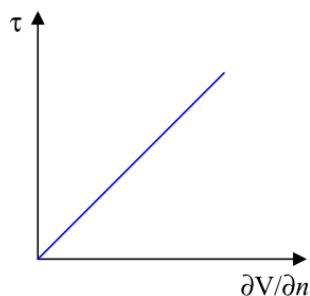


Figura 2.2 Curva de fluidez de fluidos newtonianos.

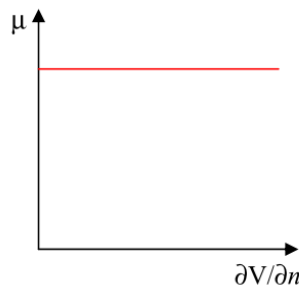


Figura 2.3 Curva de viscosidad de fluido newtonianos.

Como se puede observar en la curva de fluidez, el valor de la viscosidad μ es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, la cual es constante para cualquier valor aplicado. Además se observa en la curva de viscosidad que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada.

2.1.1.2 Fluidos No Newtonianos.

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en dependientes e independientes del tiempo. [1]

a. Fluidos independientes del tiempo.

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo umbral, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

Entre los fluidos sin esfuerzo umbral podemos encontrar los fluidos pseudoplásticos y los fluidos dilatantes.

Entre los fluidos con umbral encontramos los fluidos plásticos.

En la siguiente gráfica, figura 2.4, podemos observar el comportamiento no lineal de los fluidos no newtonianos. En este caso el de un fluido pseudoplástico.

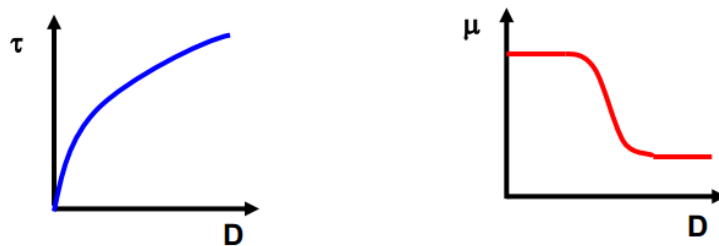


Figura 2.4 Fluidos no newtonianos. Pseudoplásticos.

b. Fluidos dependientes del tiempo.

Este tipo de fluidos se clasifican en dos: los fluidos tixotrópicos, en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado, y a los fluidos reopéticos, en los cuales su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza y vuelven a su estado anterior tras un tiempo de reposo.

2.1.1.3 Fluidos Viscoelásticos.

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

2.1.2 Fluidos Magnetoreológicos.

El descubrimiento y desarrollo de los fluidos magnetoreológicos, también conocidos como fluidos MR, puede acreditarse a Jacob Rabinow. Estos fluidos se componen de partículas magnetizables muy pequeñas suspendidas en un adecuado líquido portador. [2] Normalmente los fluidos MR son líquidos de consistencia similar a los aceites de motor, pero, cuando se aplica un campo magnético exterior se produce un momento dipolar en las partículas de hierro, formando una cadena paralela al campo como se muestra en la figura 2.5.

La alineación de las partículas de hierro suspendidas en el líquido provoca que se pueda restringir el movimiento del fluido, en consecuencia, se desarrolla una fuerza en el fluido que depende de la magnitud del campo magnético aplicado, lo interesante es que esto ocurre en pocos milisegundos.

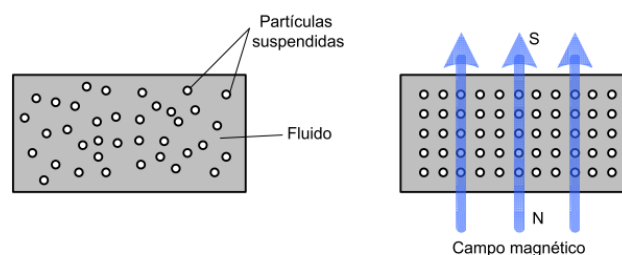


Figura 2.5 Formación de cadena paralelas al campo magnético.

Un fluido MR típico contiene del 20 al 40% de partícula de hierro del volumen total neto, dichas partículas son suspendidas generalmente en aceite mineral, aceite sintético, etc. [3] Los aceites hidrocarburos son preferidos porque son muy buenos lubricantes, durables, estables, los aditivos evitan la sedimentación de las partículas de hierro y existen en el mercado una gran variedad de fluidos con diferentes viscosidades.

Otro factor que interviene en el desarrollo de la fuerza en el fluido es la curva de saturación magnética de las partículas suspendidas. Es recomendable que el nivel de saturación magnética de las partículas sea grande para así obtener un buen fluido MR. Las aleaciones de hierro y cobalto tienen una de las mejores niveles de saturación magnética, esto es alrededor de 2.4 teslas, pero, el precio de este tipo de material es muy alto, por lo que no es muy utilizado para aplicaciones prácticas y comerciales; podemos utilizar entonces partículas de hierro carbono que tienen una saturación magnética de 2.15 teslas.

El tamaño de las partículas influye en la suspensión de las mismas en el fluido, esto es, mientras menor sea el tamaño de las partículas la suspensión en el fluido es mucho mejor, favoreciendo la regulación de la dureza de amortiguación; caso contrario mientras mayor sea el tamaño de las partículas se torna difícil la suspensión de las mismas en el fluido y por consiguiente la regulación de la amortiguación.

2.1.3 Modelado del Fluido Magnetoreológico.

Para representar matemáticamente el comportamiento de un fluido MR a menudo se utiliza el modelado de un plástico Bingham como se muestra en la figura 2.6, este describe satisfactoriamente las características del fluido magnetoreológico. [4] En este modelo el esfuerzo cortante está dado por:

$$\tau = \tau_{0(H)} + \mu \frac{\partial V}{\partial n}$$

Dónde:

$\tau_{0(H)}$ = *esfuerzo cortante dependiente del campo magnético.*

μ = *coeficiente de viscosidad.*

$\frac{\partial V}{\partial n}$ = *velocidad de deformación del fluido.*

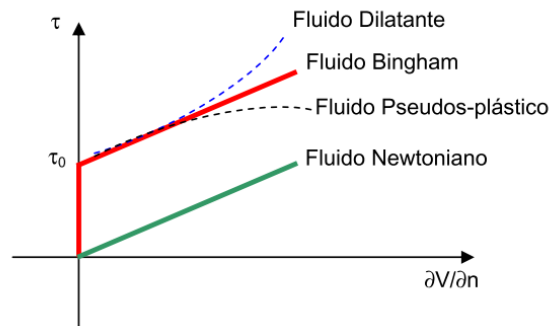


Figura 2.6 Modelo visco-plástico de los fluidos MR.

De lo anterior se deduce que la densidad de energía en los fluidos MR está limitado por la saturación magnética de las partículas de hierro. Un fluido MR tiene por lo general un valor máximo de densidad de energía de 0.1 Joule/cm³. [5] Para tener una idea de la significativa ventaja de los fluidos MR en lo referente a la densidad de energía que puede proporcionar respecto a otros fluidos como por ejemplo los fluidos electroreológicos ER, dichos fluidos tienen una densidad de energía máxima de solo 0.001 Joule/cm³; teniendo en consideración que en ambos fluidos la viscosidad es casi la misma. Esta una de las razones más importantes por las que la utilización de los fluidos MR ha tenido una gran aceptación en la construcción de dispositivos amortiguadores.

Otra ventaja es el esfuerzo cortante que se puede obtener de los fluidos MR con partículas suspendidas de hierro, que aproximadamente es de 100 kPa, y que, si comparamos con el esfuerzo cortante que puede proporcionar un fluido ER que es de 2 a 5 kPa, está claro los beneficios que obtenemos al utilizar los fluidos MR. Si consideramos la gran densidad magnética que nos ofrecen los fluidos MR podemos construir dispositivos de menores dimensiones con un gran rango de servicio. Los fluidos MR pueden operar en un rango de temperatura comprendidas entre -40 °C a 150 °C teniendo una ligera variación en su esfuerzo cortante (Carlson y Weiss 1994). Esto se produce porque la polarización magnética de las partículas de hierro suspendidas en el fluido no es afectada considerablemente por la temperatura.

Además, los fluidos MR no son afectados por las impurezas que por lo general se producen durante el proceso de fabricación y el uso del dispositivo. Cabe mencionar que la polarización magnética tampoco es afectada por los aditivos, al contrario, esto facilita la estabilidad en los fluidos MR contra la separación de las partículas, aunque las partículas y el líquido portador tengan una gran diferencia en sus densidades.

2.1.4 Propiedades físico-químicas.

2.1.4.1 Propiedades reológicas.

Las propiedades reológicas de este tipo de fluidos vienen determinadas por las siguientes características.[6]

- Concentración y densidad de las partículas.
- Distribución de forma y tamaño de las partículas.
- Las propiedades del fluido portador.
- Aditivos adicionales.
- Intensidad del campo magnético aplicado.
- Temperatura.

2.1.4.2 Propiedades magnéticas.

Es muy importante conocer las propiedades magnéticas de los fluidos magnetoreológicos para tener una visión de los posibles diseños de dispositivos en base a estos fluidos. [7] En varios de los dispositivos, el fluido representa la mayor reluctancia en el circuito magnético.

Los materiales super-paramagnéticos son los ideales para la construcción de este tipo de fluidos magnetoreológicos, su comportamiento en presencia de un campo magnético es muy conveniente para el funcionamiento esperado de este tipo de amortiguadores. Una vez aplicado un campo magnético a un fluido magnetoreológico, la primera reacción es la alineación de las partículas suspendidas en la dirección del campo magnético aplicado, formando una estructura fibrosa que cambia las características del fluido. Cuando quitamos el campo magnético, y debido a que los materiales super-paramagnéticos no tienen remanencia ni histéresis magnética, es decir, al quitar el campo magnético las partículas suspendidas en el fluido no quedan magnetizadas, el fluido magnetoreológico se comporta como un fluido newtoniano normal.

| Propiedades | Magnitud |
|--|--------------------------------------|
| Máximo esfuerzo cortante $\tau_{0(H)}$ | 50 a 100 kPa |
| Máximo campo magnético | $\cong 250$ kA/m |
| Viscosidad plástica aparente η | 0.1 a 10 Pa-s |
| Rango temperatura de operación | -40 a 150 °C |
| Estabilidad | Insensible a la mayoría de impurezas |
| Densidad | 3 a 4 g/cm ³ |
| Máxima densidad de energía | 0.1 Joule/cm ³ |
| Suministro de energía | 2 a 50 V, 1 a 2 A |

Figura 2.7 *Propiedades de los fluidos MR. [8]*

2.2 Campo Magnético.

Para el diseñar la bobina nos basaremos en algunos conceptos y leyes del magnetismo. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el comportamiento de los fluidos magnetoreológicos cambia en función del campo magnético al que se encuentre expuesto. Nuestro estudio se centrará en el uso de una bobina como fuente del campo.

2.2.1 Fuerza ejercida por un campo magnético.

La existencia de un campo magnético \mathbf{B} en un punto del espacio puede demostrarse con una brújula. Si existe un campo magnético, la aguja se alinearán en la dirección de este campo. [9]

Experimentalmente se demuestra que cuando una carga q posee la velocidad \mathbf{v} en un campo magnético, aparece una fuerza que es proporcional a q y a \mathbf{v} , y al seno del ángulo que forman \mathbf{v} y \mathbf{B} . Cuando una carga q se mueve con velocidad \mathbf{v} en un campo magnético \mathbf{B} , la fuerza magnética \mathbf{F} que actúa sobre la carga es:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Como \mathbf{F} es perpendicular a ambos, \mathbf{v} y \mathbf{B} , resulta ser perpendicular al plano definido por estos dos vectores. La dirección de $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ viene dada por la regla de la mano derecha como el eje de rotación cuando \mathbf{v} gira hacia \mathbf{B} , como se muestra en la figura 2.8. Si q es positiva, \mathbf{F} está dirigida en el mismo sentido que $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

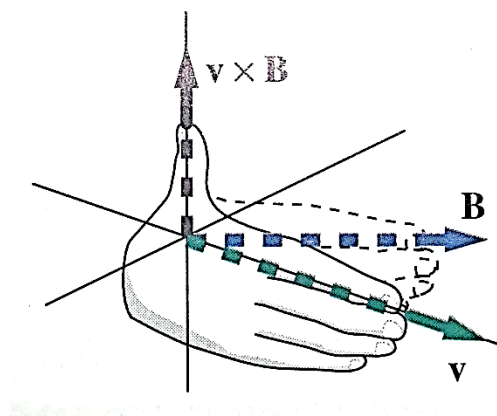


Figura 2.8 Regla de la mano derecha para la orientación de \mathbf{B} .

La ecuación de la fuerza magnética sobre una carga móvil define el campo magnético B en función de la fuerza ejercida sobre una carga móvil. La unidad del SI del campo magnético es el Tesla (T). Una carga de un culombio que se mueve con una velocidad de un metro por segundo perpendicular a un campo magnético de un tesla, experimenta una fuerza de un newton.

$$1\text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{Cm/s}} = 1\text{ N/A.m}$$

Esta unidad es bastante grande. El campo magnético terrestre es algo menor que 10^{-4} T en la superficie de la tierra. Los campos magnéticos próximos a imanes permanentes poderosos suelen ser de 0,1 a 0,5 T y los grandes electroimanes de laboratorio y de la industria producen campos de 1 a 2 T. campos magnéticos superiores a 10T son difíciles de producir, pues las fuerzas magnéticas resultantes romperían los imanes en pedazos o los aplastarían. Una unidad usada corrientemente, deducida del sistema cgs, es el gauss (G), que está relacionada con el tesla por

$$1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$$

2.2.2 Fuentes del campo magnético.

Las primeras fuentes conocidas del magnetismo fueron los imanes permanentes. Un mes después de que Oersted anunciase su descubrimiento acerca de la desviación de la aguja de una brújula por la acción de una corriente, Jean Baptiste Biot y Felix Savart descubrieron los resultados de sus medidas del momento de fuerza que actúa sobre un imán próximo a un conductor largo por el que circula corriente y analizaron estos resultados en función del campo magnético producido por cada elemento de corriente. André Marie Ampère amplió estos experimentos y demostró que los propios elementos de corriente experimentan una fuerza en presencia de un campo magnético, en particular demostró que dos corrientes se ejercen fuerzas entre sí. [10]

De las distintas formas que existen para crear un campo magnético, nos centraremos en el estudio del campo creado por una corriente en un solenoide.

2.2.2.1 Campo magnético B debido a una corriente en un solenoide.

Un solenoide es un alambre enrollado en forma de hélice con espiras muy próximas entre sí, figura 2.9. El solenoide se usa para producir un campo magnético intenso y uniforme en la región rodeada por sus espiras. Desempeña en el magnetismo un papel análogo al de un condensador de placas paralelas con objeto de proporcionar un campo electrostático uniforme e intenso entre sus placas. El campo magnético de un solenoide es esencialmente el de una serie de N espiras idénticas situadas unas junto a otras.

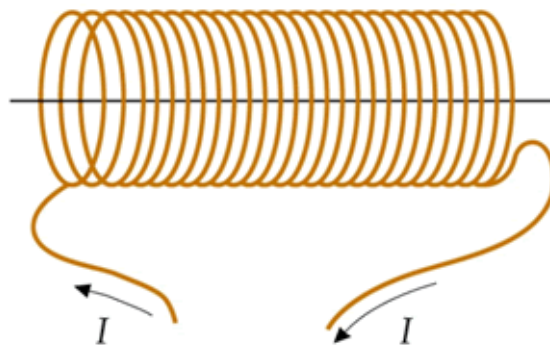


Figura 2.9 Solenoide.

La figura 2.10 muestra las líneas de campo correspondientes a un solenoide largo y enrollado de forma compacta. Dentro del solenoide, las líneas son aproximadamente paralelas al eje y están espaciadas estrecha y uniformemente, indicando la existencia de un campo uniforme e intenso. Fuera del solenoide las líneas son mucho menos densas. Divergen de un extremo y convergen en el otro. Las líneas de campo de un solenoide, tanto en el interior como en el exterior, coinciden con las de una barra imanada de igual forma que el solenoide.

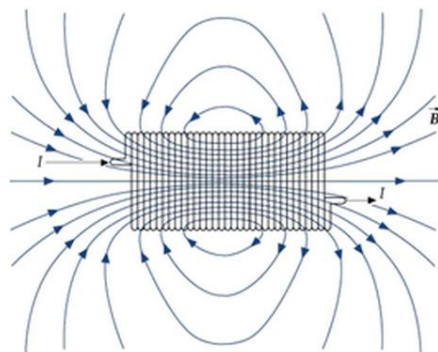


Figura 2.10 Líneas de campo magnético creadas por un solenoide.

Consideremos un solenoide de longitud L formado por N vueltas de cable conductor que transporta una corriente de intensidad I . Elegimos el eje del solenoide como eje x , con el extremo izquierdo en $x = x_1$ y el extremo derecho en $x = x_2$ como indica la figura 2.11. Calculemos el campo magnético en el origen. La figura muestra un elemento del solenoide de longitud dx a una distancia x del origen. Si $n = N/L$ es el número de vueltas por unidad de longitud, en este elemento existen $n dx$ vueltas de alambre, cada una de las cuales transporta una corriente I . Por lo tanto, el elemento es equivalente a una simple espira que transporta una corriente $di = nI dx$.

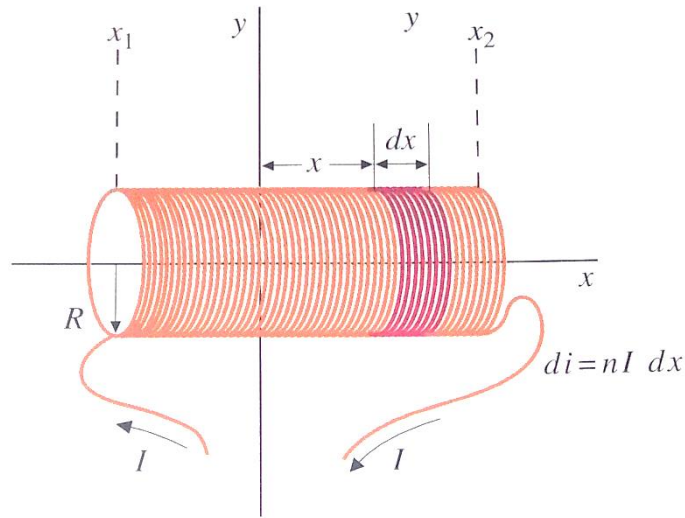


Figura 2.11 Geometría para el cálculo del campo magnético dentro de un solenoide.

B_x en el eje del solenoide para $x=0$.

$$B_x = \frac{1}{2} \mu_0 n I \left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + R^2}} - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + R^2}} \right)$$

La figura 2.12 muestra el gráfico del campo magnético sobre el interior de un solenoide en función de la posición x sobre dicho eje. El campo interior al solenoide es casi constante excepto cerca de los extremos. La longitud L del solenoide es diez veces más larga que la de su radio.

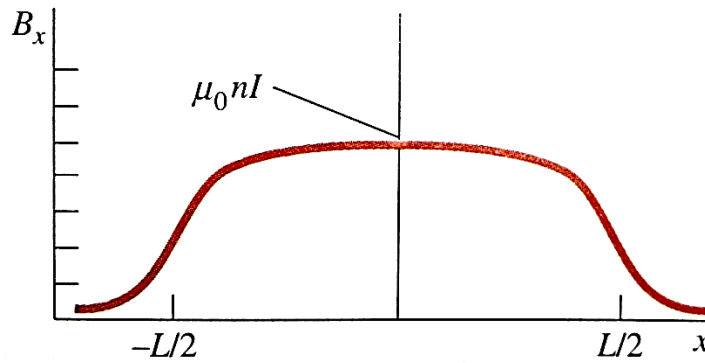


Figura 2.12 Gráfico del campo magnético sobre el eje interior de un solenoide.

2.2.3 Inducción Magnética.

La inducción magnética es el proceso mediante el cual campos magnéticos generan campos eléctricos. Al generarse un campo eléctrico en un material conductor, los portadores de carga se verán sometidos a una fuerza y se inducirá una corriente eléctrica en el conductor.

El campo magnético es un concepto introducido en Electromagnetismo para explicar las fuerzas que aparecen entre corrientes eléctricas. Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas. Una carga eléctrica en movimiento que es equivalente a una corriente eléctrica, a una velocidad u , aparecerá una fuerza de origen magnético sobre la carga que es proporcional a q , a su velocidad u , y es perpendicular a esta última, figura 2.13, esta fuerza es proporcional y perpendicular a la **inducción magnética B** en ese punto del espacio y se satisface la siguiente relación. [11]

$$F = q(u \times B) \text{ [N]}$$

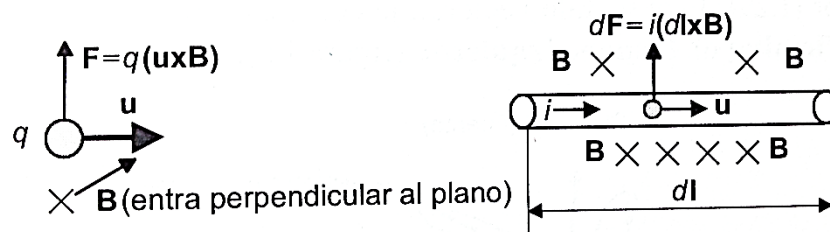


Figura 2.13 Fuerza de un campo magnético de inducción B .

2.2.4 Campo magnético H , imanación M , y permeabilidad μ .

Las propiedades magnéticas de los materiales son debidas a una propiedad cuántica del electrón que recibe el nombre de momento magnético de espín. El giro del electrón sobre sí mismo es equivalente a un dipolo magnético formado por una espira de superficie S llevando una corriente i , el momento del dipolo \mathbf{m} es igual al producto de i por S y es perpendicular a la superficie S , tomando como sentido positivo de la superficie el correspondiente a la traslación de un sacacorchos que girase en el sentido de la corriente, es decir contrario al movimiento del electrón. [12] Figura 2.14.

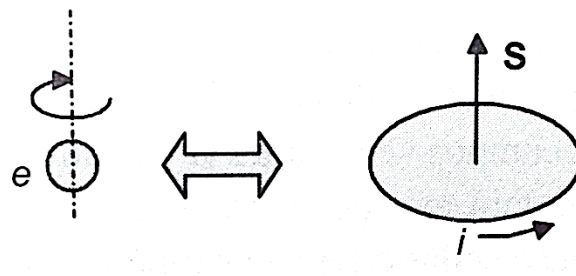


Figura 2.14 Espín del electrón y su dipolo equivalente.

Se define el **campo de imanación M** de un material magnético, o vector de magnetización al momento dipolar magnético por unidad de volumen:

$$M = \lim_{\Delta_v \rightarrow 0} \frac{\sum m}{\Delta_v} \quad [A/m]$$

El lector puede observar el paralelismo existente entre el momento dipolar y polarización de los materiales dieléctricos con el momento magnético e imanación de los ferromagnéticos.

El **campo magnético H** se define a partir de la inducción B y la imanación M por la relación.

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad [A/m]$$

Donde μ_0 representa la constante magnética o **permeabilidad del vacío**, que vale:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad [Vs/Am]$$

Que se mide en voltios-segundo/amperio-metro o simplemente como se comprenderá más adelante, en henrios/metro (H/m).

Cuando el medio magnético es lineal e isótropo, la imanación m es directamente proporcional al campo magnético.

$$M = \chi_m H \quad [A/m]$$

Donde χ_m es una cantidad sin dimensiones que se denomina susceptibilidad magnética. Operando con las ecuaciones anteriores tenemos:

$$B = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu_0\mu_r H = \mu H \quad [Teslas]$$

Dónde:

$$\mu_r = 1 + \chi_m = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Es una constante sin dimensiones que se conoce con el nombre de permeabilidad relativa del medio. El coeficiente $\mu = \mu_r\mu_0$ es la permeabilidad absoluta o simplemente permeabilidad.

En la gran mayoría de los materiales la permeabilidad relativa es prácticamente a la unidad. Se denominan materiales diamagnéticos los que tienen un valor μ_r cercano a 1 por exceso. En el caso de los materiales ferromagnéticos μ_r puede tener un valor muy grande pero se comportan como medios no lineales, μ_r no depende no solamente de la magnitud H sino también de la historia previa del material, existe un efecto de memoria que se denomina histéresis.

2.2.5 Propiedades magnéticas de los materiales.

El magnetismo es el fenómeno por medio del cual los materiales ejercen fuerzas de atracción o de repulsión sobre los materiales. [13]

Las fuerzas magnéticas se generan cuando se mueven partículas cargadas eléctricamente.

Las propiedades macroscópicas de los materiales son producto de los momentos magnéticos asociados con los electrones individuales.

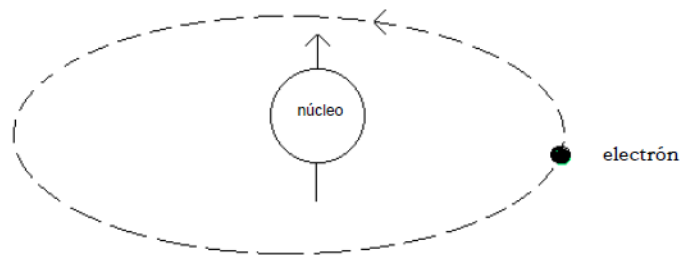


Figura 2.15 Momento magnético causado por la rotación del electrón.

Cuando el electrón gira alrededor del núcleo, se convierte en una carga eléctrica en movimiento, por lo que se genera un momento magnético.

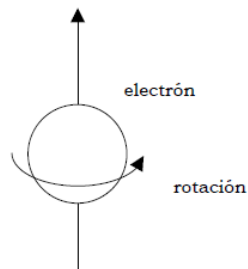


Figura 2.16 Momento magnético creado por la rotación del electrón.

Cada electrón gira alrededor de sí mismo creando un campo magnético.

El momento magnético neto de un átomo es la suma de los momentos magnéticos generados por los electrones. Si incluyen los momentos orbitales, de rotación, y el hecho que los momentos puedan cancelarse.

En los átomos donde los niveles de energía de los electrones están completamente llenos, todos los momentos se cancelan. Estos materiales no pueden ser magnetizados permanentemente.

2.2.5.1 Tipos de magnetismo.

Diamagnetismo.

Es una forma muy débil de magnetismo, la cual es no permanente y persiste no solamente cuando se aplica un campo externo.

Es inducido por un cambio en el movimiento orbital de los electrones, debido al campo magnético aplicado. El diamagnetismo se encuentra en todos los materiales, pero debido a que es muy débil, solo puede ser observado cuando otros tipos de magnetismo están ausentes.

Esta forma de magnetismo no tiene uso práctico.

Paramagnetismo.

Algunos materiales sólidos, cada átomo posee un dipolo permanente debido a la cancelación incompleta de los momentos causados por la rotación del electrón y la órbita del electrón.

Cuando no existe un campo magnético externo, las orientaciones de los momentos magnético externo, las orientaciones de los momentos magnéticos de los átomos son aleatorias, y el material no posee magnetismo macroscópico neto.

Los dipolos atómicos pueden rotar libremente, y el paramagnetismo resulta cuando los dipolos se alinean, por rotación, con un campo externo.

Los materiales diamagnéticos y paramagnéticos se consideran materiales no magnéticos, porque solamente presentan magnetismo en presencia de un campo externo. En este tipo de materiales se encuentra el aire y el aluminio.

Ferromagnetismo.

Ciertos metales poseen un momento magnético en la ausencia de un campo externo, y muestran magnetismo macroscópico muy grande y permanente. Estas son las características del ferromagnetismo, y son mostrados por el hierro BCC (ferrita), cobalto, níquel y algunos metales d tierras raras.

El momento magnético permanente en los materiales ferromagnéticos resultan de los momentos causados por la rotación de los electrones, los cuales no se cancelan a causa de la estructura electrónica.

En los materiales ferromagnéticos, los momentos de los átomos adyacentes hacen que estos se alineen aun en la ausencia de un campo externo.

2.2.6 Electroimanes.

Recibe el nombre de electroimán el conjunto formado por una bobina y un núcleo de hierro colocado en el interior de la misma. El núcleo de hierro se imanta por influencia del campo magnético creado por la bobina durante todo el tiempo que dure el paso de la corriente por sus espiras, resultando un campo más intenso que el producido por la bobina. [14]

Existen diversos tipos de electroimanes. Los más usados son los de herradura, los acorazados y los electroimanes de succión.

En el trabajo de diseño del circuito magnético lo más apropiado es el determinar el valor de los amperios-vuelta (**NI**) necesarios para el circuito magnético. [15]

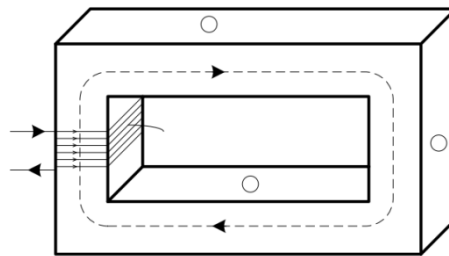


Figura 2.17 Circuito magnético en serie.

El flujo magnético establecido por el electroimán está definido por la letra griega Φ , sus propiedades son similares a las de la corriente que atraviesa un circuito eléctrico.

Una bobina de **N** espiras y corriente **i** alrededor de un núcleo ferromagnético produce una fuerza magnetomotriz **F** (mm) que viene dada por:

$$F = NI \text{ [Amperios – espira]}$$

El comportamiento del flujo magnético cuando atraviesa una determinada superficie **A**, recibe el nombre densidad de flujo o inducción magnética, viene dada en teslas (**T**) y está determinada por la ecuación:

$$B = \frac{\Phi}{A} \text{ [Teslas]}$$

CAPÍTULO 3. SOFTWARE Y SIMULACIÓN.

Para lograr conseguir los objetivos propuestos nos apoyaremos en herramientas de simulación. El mercado nos ofrece varios software de simulación, de los cuales debemos elegir el que más se adecue a nuestras necesidades. Para ello debemos tener en cuenta la complejidad del diseño así como la facilidad de manipulación del simulador.

Consideraremos las siguientes herramientas:

- MagCad.
- Magnet.
- Ansys Maxwell.

3.1 MagCAD.



Figura 3.1 Imagen del simulador MagCAD.

MagCAD es una herramienta de software para cálculo (cálculo ,modelización) de la distribución espacial del campo magnético creado por imanes permanentes y bobinas eléctricas en presencia de materiales ferromagnéticos no lineales en sistemas cilíndricos simétricos. El campo magnético se calcula mediante la solución numérica de la ecuación para el vector potencial en una rejilla uniforme en dos dimensiones. [16]

Características principales:

- Editor gráfico integrado.
- Campo de visualización inmediata.
- No hay restricciones a la forma y tamaño de los imanes, bobinas y ferromagnéticos.
- Posibilidades para imprimir, guardar y exportar tanto que proyecto y el campo calculado.
- Periodo de prueba gratuito.

La precisión de los cálculos de MagCAD se comprobó varias veces en comparación con los campos medidos experimentalmente en sistemas reales. La comparación ha mostrado una buena precisión de los cálculos, restringidos principalmente por la indeterminación de las propiedades magnéticas de los materiales y la discretización de la geometría que es esencial solamente en la descripción de los detalles pequeños.

3.2 Magnet.



Figura 3.2 Imagen del simulador Magnet.

Magnet es un software de simulación de campos electromagnéticos que permite modelar rápidamente y predecir el rendimiento de cualquier dispositivo electromagnético o electromecánico. [17]

Las soluciones que nos ofrece Magnet están basadas en el método de elementos finitos de alta precisión para las simulaciones estáticas, dependientes de la frecuencia o para campos magnético que varían con el tiempo.

La eficiencia es clave, por ello Magnet incluye funciones automatizadas que reducen el tiempo necesario para realizar cada ciclo del diseño.

Características principales:

- Generador de mallas Multicore, solucionadores y postprocesador para obtener datos aún más rápidos.
- Simula el proceso de magnetización y la desmagnetización.
- Modelado de impedancia superficie no lineal.
- Interfaz de usuario actualizada.
- Funciones CAD actualizados.
- Mejor visualización de las parcelas de campo y las flechas.
- Mejora de la función gráfica.
- Mejoras en el mallado automático.

3.3 ANSYS Maxwell.

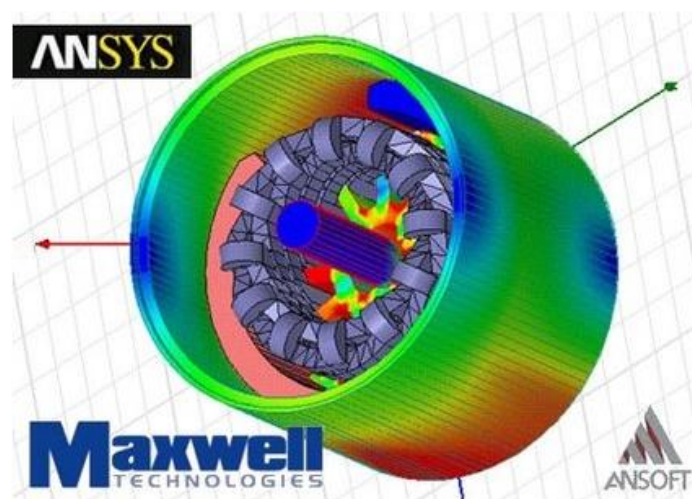


Figura 3.3 Imagen del simulador ANSYS Maxwell.

ANSYS Maxwell es un software de simulación de campo electromagnético para los ingenieros encargados de diseñar y analizar los dispositivos electromecánicos, como motores, actuadores, sensores y transformadores, bobinas de 3-D y 2-D electromagnética. Maxwell utiliza el método de los elementos finitos precisa para resolver estática, dominio de la frecuencia, y variable en el tiempo los campos electromagnéticos y eléctricos. Un beneficio clave de ANSYS Maxwell es su proceso de solución automatizada, para lo cual es necesario que especifique sólo la geometría, las propiedades del material y la salida deseada. Desde este punto, Maxwell genera automáticamente una malla adecuada, eficiente y precisa para

resolver el problema. Esta adaptación automática elimina la complejidad del proceso de análisis y le permite beneficiarse de un fácil de utilizar el flujo de diseño altamente eficiente. [18]

Una característica clave en ANSYS Maxwell es la capacidad de generar, modelos de orden reducido de alta fidelidad de la solución de elementos finitos para el uso en ANSYS Simplorer, el software de simulación del sistema multidominio de ANSYS. Esta capacidad crea un poderoso caudal de diseño electromagnético basado en que le permite combinar circuitos complejos con modelos de componentes precisos de Maxwell para el diseño de sistemas electrónicos de potencia completa de alto rendimiento electromecánico.

3.4 Elección de la herramienta de simulación.

Una vez observadas las características y las soluciones que nos presentan los simuladores citados, para este proyecto se va a utilizar ANSYS Maxwell versión 16.0, este simulador presenta una serie de ventajas sobre los demás como la interfaz que utiliza, el modelado en 2D y 3D, es un programa complejo, pero que cuenta con una serie de tutoriales y guías de fácil interpretación y manejo que nos ayudará a conseguir los objetivos propuestos.

3.5 Tutorial ANSYS Maxwell Versión 16.0

Una vez elegido el simulador, elaboraremos una serie de guías o tutoriales básicos para el manejo del programa en función de los objetivos que se pretende alcanzar. Para ello nos guiamos en el manual de instrucciones del Ansys Maxwell y en imágenes del propio software.

El programa es potente y complejo. De modo que nos centraremos en dar unas pautas de como dibujar geometrías, cambiar sus formas y dimensiones, elegir y cambiar los materiales de los cuales están compuestos los dispositivos, así como de la simulación y otras funciones del software necesarias para conseguir nuestros objetivos.

A continuación, figura 3.4, se muestra una imagen del escritorio de trabajo del programa, donde mostramos las partes principales para empezar a familiarizarnos con él.

Como ya he explicado antes, la simulación puede realizarse tanto en dos dimensiones como en tres dimensiones, lo único que cambiaría en el caso de dos, son los ejes en la pantalla de modelado.

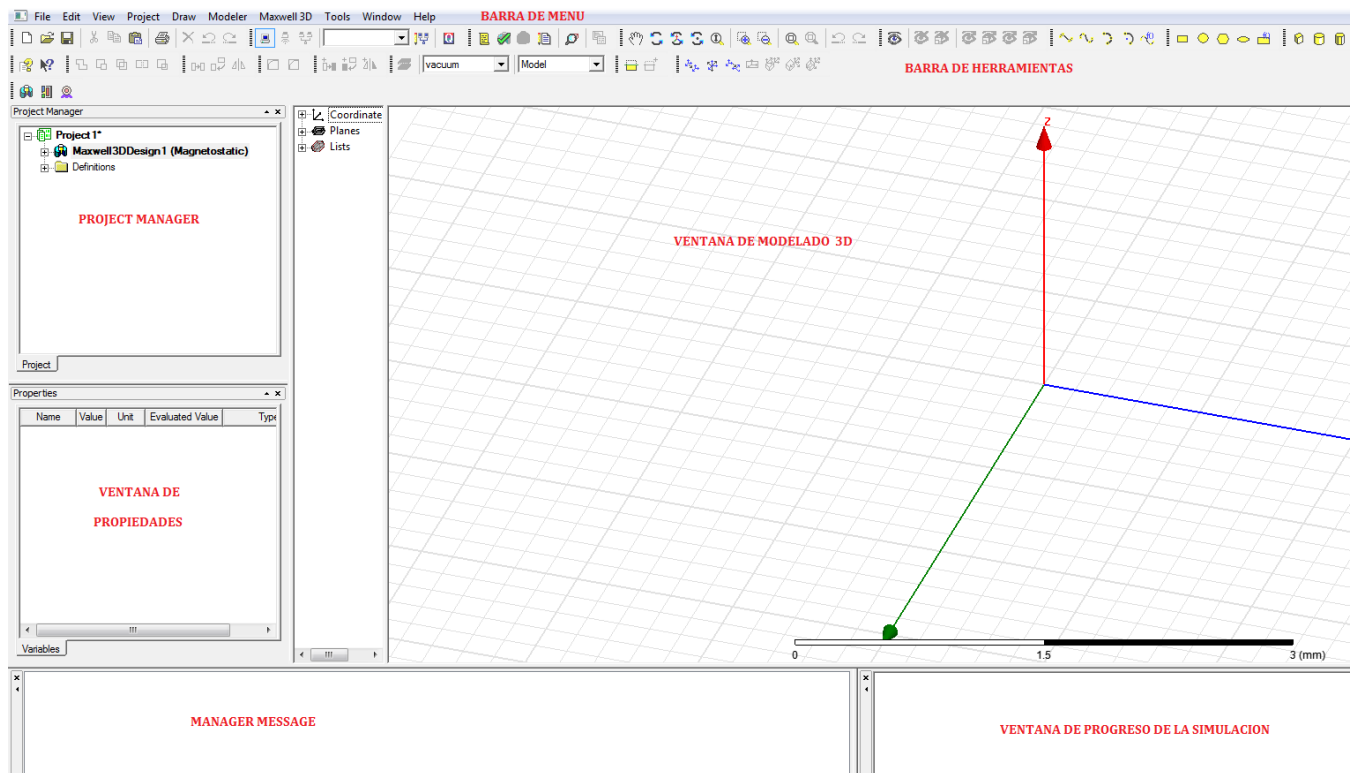


Figura 3.4 Imagen del escritorio de trabajo de ANSYS Maxwell 16.0

3.5.1 Configuración del Diseño.

Un proyecto es la colección de uno o más diseños que se guarda bajo una única extensión *mxwl*. Automáticamente se crea un proyecto cuando ejecutamos por primera vez el simulador.

El primer paso para la configuración de un proyecto en Maxwell es añadir un diseño al proyecto activo.

3.5.1.1 Abrir Maxwell y guardar un Nuevo Proyecto.

Para abrir Maxwell y guardar un proyecto:

- Doble-clic en el icono **Maxwell16.0** del escritorio de Windows.
- Para insertar un diseño. Clic en **Project** y seleccionar uno de los siguientes:
 - **Insert Maxwell 3D Design.**
 - **Insert Maxwell 2D Design.**
 - **Insert RMxpert Design.**

La figura 3.5 muestra una imagen de los pasos previos que debemos realizar para la correcta inserción de un diseño nuevo al proyecto creado.

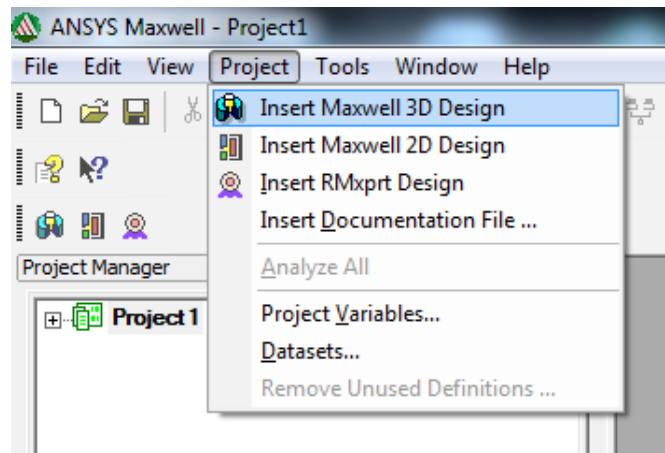


Figura 3.5 Tipos de diseño.

Un nuevo diseño aparecerá en el **Project Manager**. Será nombrado como *Maxwell3DDesignn*, *Maxwell2DDesignn*, o *RMxprrDesignn* por defecto, donde **n** es el número correspondiente al orden en el que se ha añadido al diseño. En este ejemplo, figura 3.6, se ha elegido un diseño en 2D.

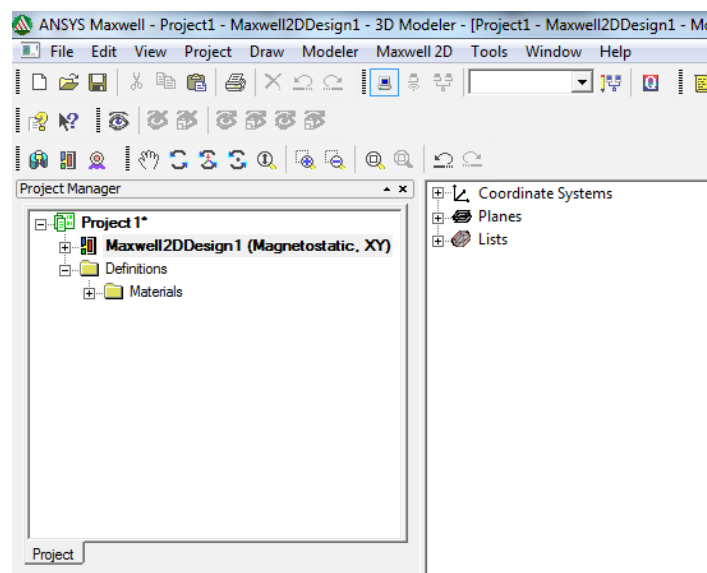


Figura 3.6 Creación de un nuevo proyecto.

La ventana de modelado aparecerá a la derecha del **Project Manager**. Ahora podemos crear un modelo geométrico. En este ejemplo se ha elegido habíamos elegido un diseño en dos dimensiones.

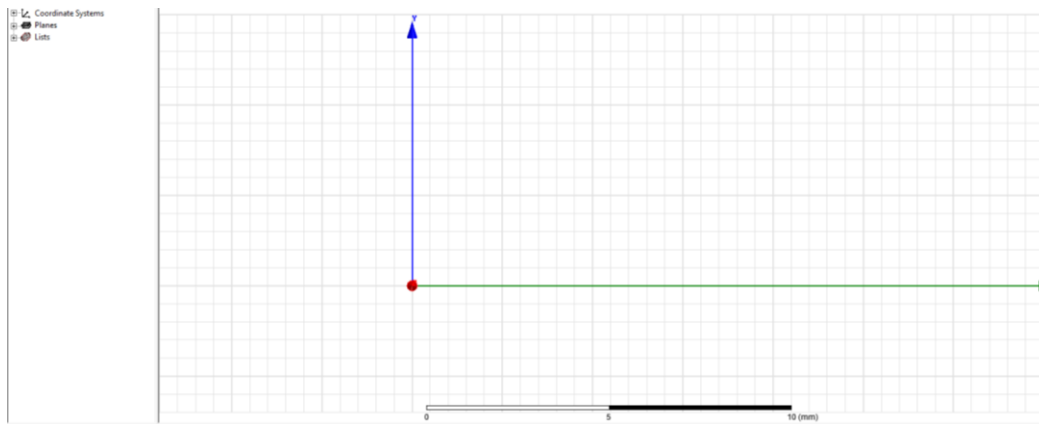


Figura 3.7 Ventana de modelado.

Debemos guardar y renombrar tanto el proyecto como los diseños que se han creado.

- Clic **File> Save As**. Aparecerá el cuadro de dialogo.
- Localiza y selecciona la carpeta en la que se desea guardar el proyecto.
- Nombramos el proyecto y lo guardamos en la carpeta seleccionada.
- Ahora renombramos el diseño. Clic derecho en *Maxwell2DDesign1* > **Rename**, y lo nombramos con el mismo nombre que el proyecto. De esta forma el diseño y el proyecto tendrán el mismo nombre.

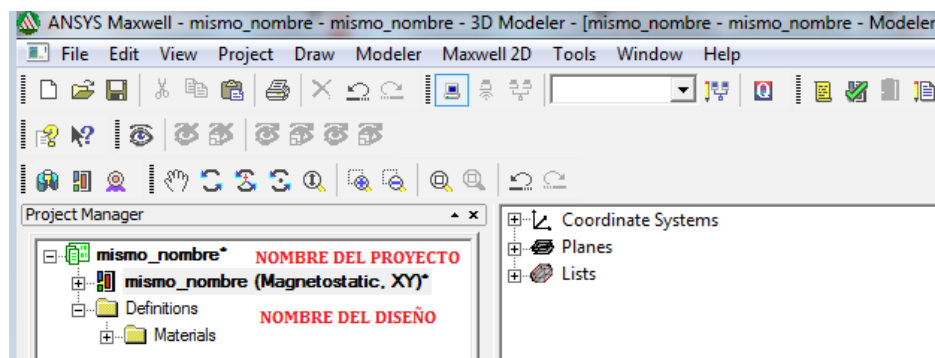


Figura 3.8 Creación de un nuevo diseño.

3.5.1.2 Especificar el Tipo de Solución.

Como se mencionó en la introducción, se dispone de múltiples tipos de soluciones, en función una aplicación específica.

- Clic **Maxwell2D** o **Maxwell3D** de la barra de menú según sea el caso > **Solution Type**. El cuadro de dialogo del tipo de soluciones aparecerá.
- Se nos muestra los tipos de soluciones disponibles.
- Clic **OK**.

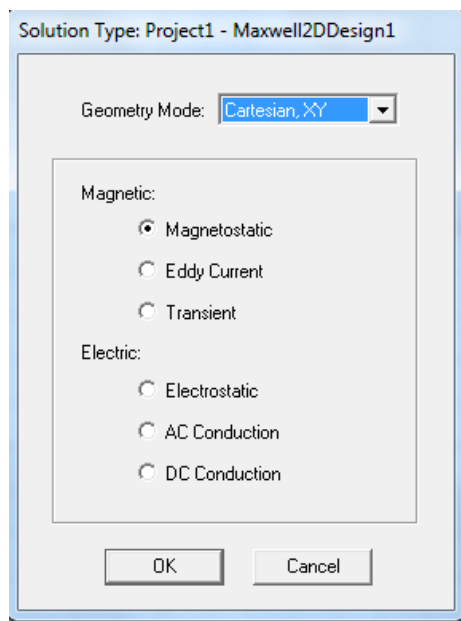


Figura 3.9 Tipos de soluciones para los proyectos.

En el cuadro **Geometry Mode** es posible cambiar las coordenadas de trabajo en función de las condiciones que tenga nuestro diseño.

3.5.1.3 Configuración de unidades.

Maxwell nos permite configurar las unidades en las que se desea trabajar.

- Clic **Modeler > Units**.
- Seleccionar una opción.
- Clic **OK**.

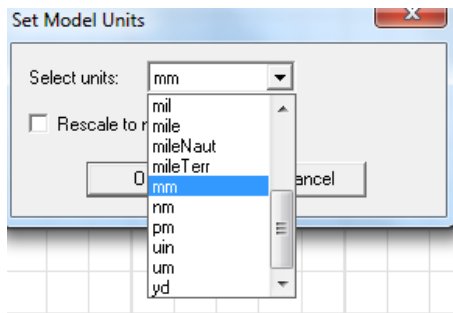


Figura 3.10 Unidades disponibles.

3.5.2 Modelado Geométrico.

- En la barra de **Menú** tenemos el comando **Draw** para dibujar las diferentes figuras u objetos que necesitamos.
- Podemos también dibujarlas por coordenadas, o por las dimensiones características de cada figura como el área, perímetro, diámetro o radio.
- En la tabla de atributos se puede cambiar el nombre, el color, la transparencia del objeto o el material del que esté compuesto.

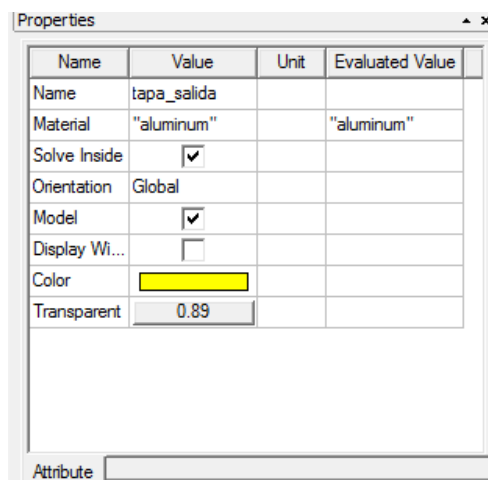


Figura 3.11 Tabla de atributos.

El modelado geométrico es una de las partes más complejas del simulador, para ello Maxwell nos ofrece una gran variedad de comandos y operaciones como cortar, duplicar, sumar o restar objetos con el fin de facilitarnos el trabajo. Para una información más detallada de estas operaciones podemos consultarlo en el Manual de instrucciones de ANSYS Maxwell 16.0.

3.5.3 Asignar materiales a los objetos.

El poder asignar el tipo de material a cada objeto nos permitirá obtener resultados más óptimos para el funcionamiento del embrague. Para acceder a la base de datos de los materiales, seleccionamos el objeto en el desplegable de la pantalla del modelado.

- Clic derecho > **Properties**. Aparecerá la tabla de atributos.
- En el cuadro donde se especifica el material, **Material**, seleccionamos **Edit**.

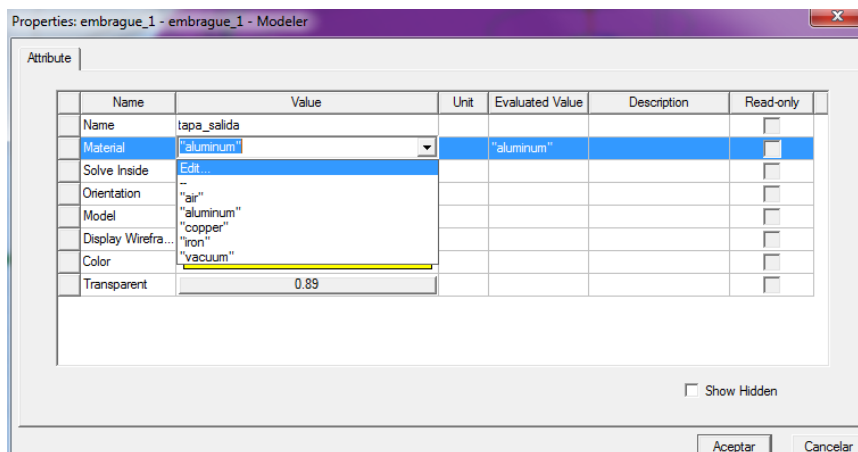


Figura 3.12 Tabla de atributos. Modificación de materiales.

Tabla de la base de datos de los materiales disponibles en la version de ANSYS Maxwell 16.0.

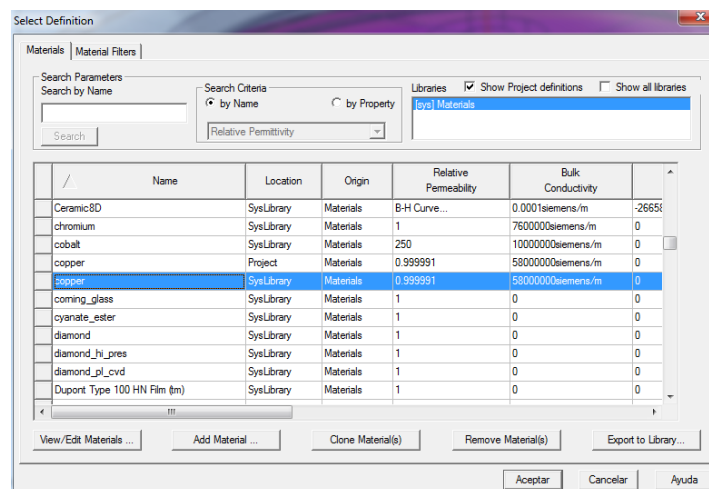


Figura 3.13 Tabla de la base de datos de los materiales.

Una vez que hemos encontrado la base de datos, cambiamos los materiales de los objetos, Maxwell nos permite incluso introducir un material nuevo si conocemos sus propiedades correspondientes como la permitividad relativa, propiedades conductivas o propiedades magnéticas.

Para ello en la tabla de materiales seleccionamos **Add Material**. El nuevo cuadro de dialogo nos permite cambiar su nombre y características. Figura 3.14

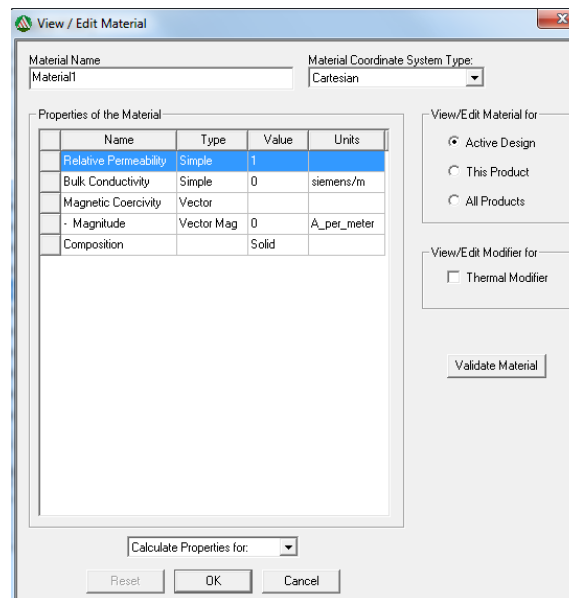


Figura 3.14 Añadir nuevo material.

3.5.4 Asignar Límites y Excitaciones.

Para cada proyecto, es necesario asignar los límites y las excitaciones. Para los diseños en 3D, podemos utilizar el simulador para realizar lo siguiente:

- Definir las condiciones de frontera que controlan la forma en que el campo eléctrico o magnético se comporta en las caras de objetos, planos de simetría y la periodicidad y en los bordes de la región problema.
- Definir las excitaciones de tensión, carga, bobina, y corriente.
- Identificar los conductores en los que se inducen corrientes de Foucault.
- Para los proyectos transitorios magnéticos, configurar una conexión de bobinado y un circuito externo.
- Cada solucionador de campo requiere que se especifique excitaciones de los campos y las referencias eléctricas o magnéticas para el cálculo de estos campos.

Cada solucionador de campo requiere que se especifique excitaciones de los campos y las referencias eléctricas o magnéticas para el cálculo de estos campos.

- Límites y excitaciones magnetostáticas.
- Límites y excitaciones electrostáticas.
- Límites y excitaciones de la conducción de CC.
- Editar Límites y excitaciones actuales.
- Los límites transitorios y excitaciones.
- Límites y excitaciones eléctricas transitorias.

Se debe especificar al menos una de las condiciones de contorno o excitaciones que figuran en estas secciones, para que el simulador pueda calcular los valores exactos de los campos y sus parámetros.

Como ejemplo, asignaremos la corriente a una bobina que previamente ha sido creada. La seleccionamos en el desplegable de la ventana de modelado.

- Clic **Maxwell 2D o Maxwell 3D** según sea el caso **>Excitations>Assign>Current**.
- En el cuadro de dialogo de la corriente introducimos su valor en amperios por vuelta. Por ejemplo si son 2 amperios y 250 vueltas, pondremos 400 A como valor.
- Con **Swap Direction** podemos elegir el sentido de la corriente, puede ser positiva o negativa.
- Clic OK para completar el proceso de asignación.

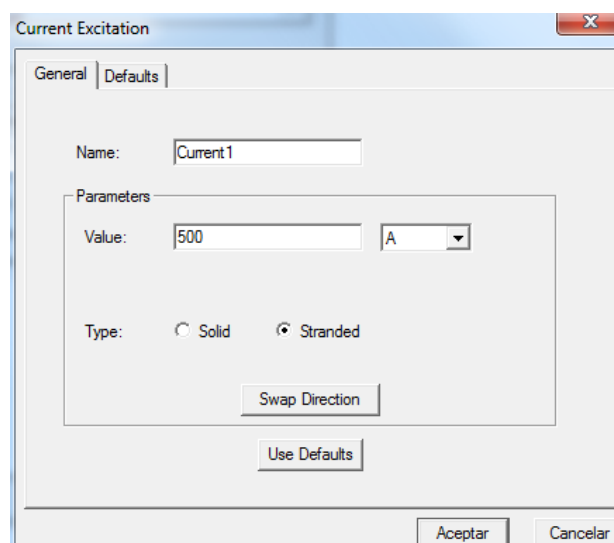


Figura 3.15 Añadir excitaciones. Por ejemplo la corriente.

La corriente aparecerá en la lista de las **Excitations** en la ventana del **Project Manager** y por defecto se nombrará **Current1**.

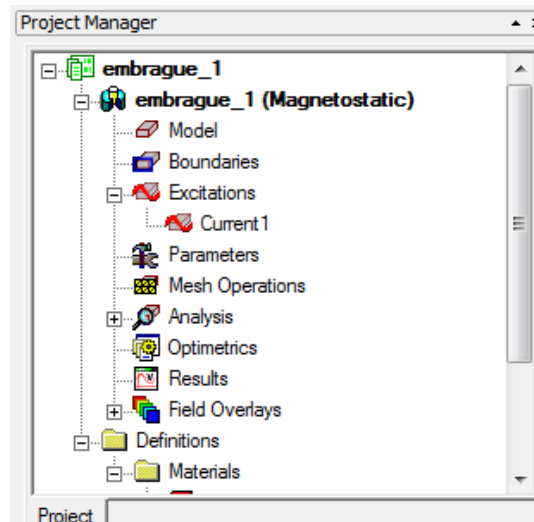


Figura 3.16 Asignación de excitaciones al proyecto.

3.5.5 Configuración y Ejecución de un Análisis.

Configuración del análisis.

Para configurar un análisis:

- Clic derecho en **Analysis** en el **Project Manager**.
- Seleccionar **Add Solution Setup**.
- Clic en la opción General.
- Acepte los valores por defecto.
- Clic **OK**.

Ejecución de un análisis.

Para ejecutar un análisis:

- Clic derecho en **Analysis** en el **Project Manager**.
- Seleccionar **Analyze All**.
- Una vez terminada la simulación podemos consultar los resultados.

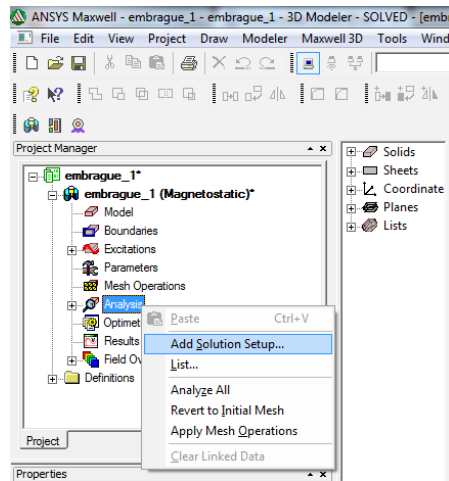


Figura 3.17 Ejecución de un análisis.

Podemos visualizar los resultados de una simulación mediante tablas o graficas de los campos o magnitudes que se desea estudiar. En la figura 3.18, se observa la magnitud del campo magnético en distintas zonas del objeto de análisis.

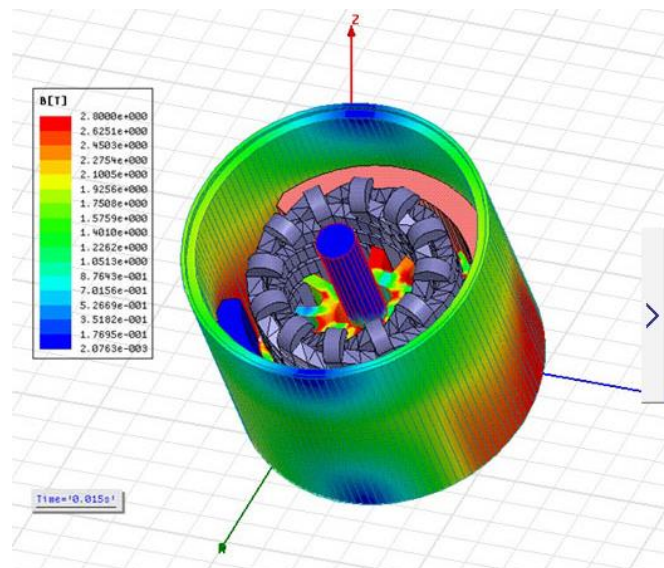


Figura 3.18 Resultado de una simulación.

3.5.6 Importación de archivos a ANSYS Maxwell.

Una de las ventajas que nos llevó a elegir este programa, es la posibilidad de trabajar con modelos creados en otros simuladores CAD, dándonos así, la facilidad para modificar o mejorar el diseño del dispositivo.

Para realizar la simulación sobre un modelo realizado en otro software debemos importar el diseño para trabajar sobre él.

Ansys Maxwell permite importar diseños realizados en otros simuladores como Solid Edge, Autocad, Solidworks etc. Pero debemos tener en cuenta los formatos que son compatibles para la importación.

ACIS SAB Files (*.sab)
ACIS SAT Files (*.sat)
Ansoft 2D Modeler Files (*.sm2)
Ansoft 3D Modeler Files (*.sm3)
Ansoft Geometry File (*.AnstGeom)
Ansoft Legacy 3D Files (*.sld)
AutoCAD Files (*.dxf;*.dwg)
Catia V4/V5 Files (*.exp;*.model;*.CATPart;*.CATProduct)
GDSII Files (*.gds)
IGES Files (*.iges;*.igs)
NASTRAN Files (*.nas)
Parasolid Files (*.x_t;*.x_b)
Pro/E Files (*.prt;*.asm)
STEP Files (*.step;*.stp)
STL Files (*.stl)
Unigraphics Files (*.prt)

Figura 3.19 Formatos compatibles con Ansys Maxwell.

Para importar un modelo 3D:

- Clic **Modeler > Import**.
- Seleccione un tipo de archivos compatible.
- Use el buscador para encontrar el archivo que se desea importar.
- Seleccione el modelo 3D o introduzca su nombre en el cuadro de búsqueda.
- Clic **Open**.

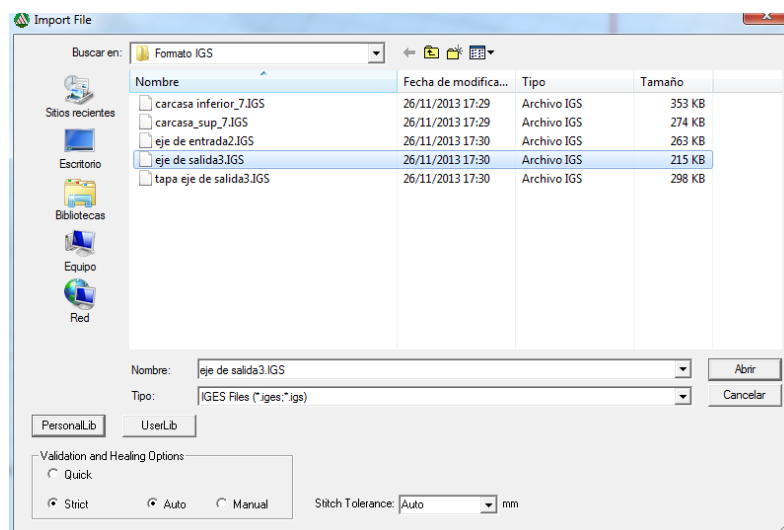


Figura 3.20 Importar un archivo.

Ahora tenemos el archivo importado y se puede visualizar y modificar en la ventana de modelado del simulador. La figura 3.22 muestra un modelo importado con extensión *igs*, construido con otro software.

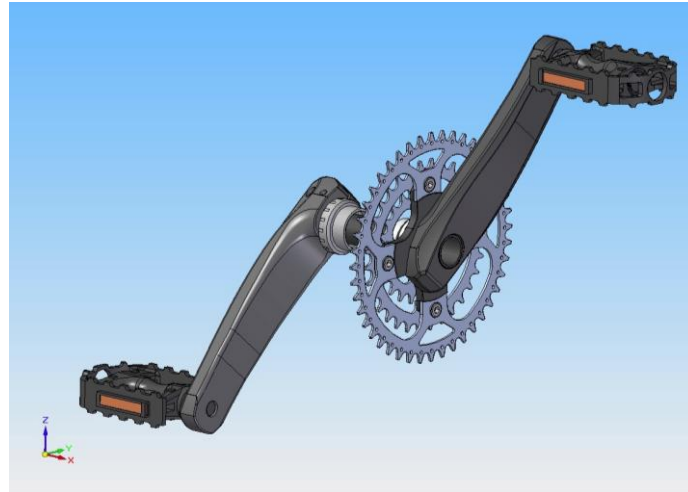


Figura 3.21 Modelo construido con su programa de origen.

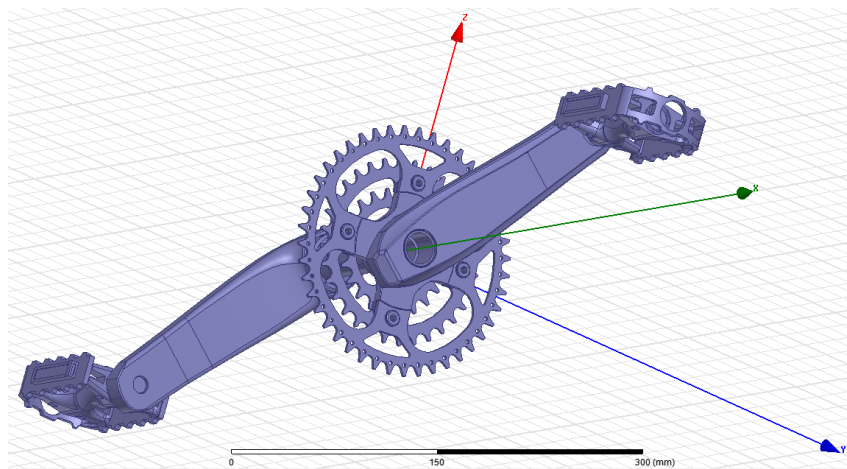


Figura 3.22 Modelo importado a Ansys Maxwell.

Los modelos construidos con la extensión de archivos *igs*, al importarlos a Maxwell, mantienen todas sus características y medidas iniciales. No ha sido así con otro tipo de archivos que se ha importado, por lo que se recomienda el uso de esta extensión como origen del modelo.

CAPÍTULO 4. GEOMETRÍA DEL EMBRAGUE.

El embrague propuesto es de forma cilíndrica como el que muestra la figura 4.1. El cilindro está conectado al eje 1, y en su interior hay un disco delgado (conectado al eje 2), cuya separación es mínima. El fluido MR se encuentra en esta separación.

El par de torsión se transmite de un eje al otro a través del fluido en el que se encuentran inmersos. La viscosidad de este fluido cambia mediante la variación de la intensidad del campo magnético aplicado a través del embrague. Como resultado obtenemos diferentes capacidades de embrague.

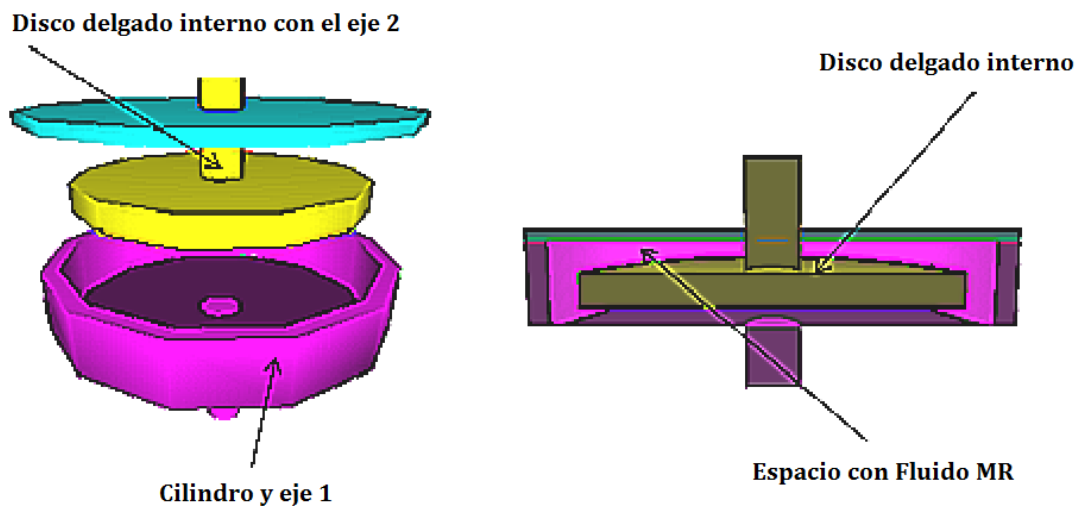


Figura 4.1 Diseño de embrague propuesto.

Para obtener mejores resultados, el área del disco circular interno debe ser lo más grande posible, manteniéndolos siempre dentro de los límites del diseño.

Las líneas de campo magnético deben atravesar perpendicularmente el área del disco interior delgado. El par transmitido al eje de salida, depende directamente al área de contacto en la dirección del campo magnético.

El campo magnético necesario será creado por una bobina colocada de manera que envuelva al cilindro y al fluido para así lograr una óptima magnetización. Dicha bobina estará protegida por una carcasa metálica.

4.1 Modelos previos de la Geometría del Embrague. 2D.

Para empezar a familiarizarnos con el nuevo software realizaremos un modelo en dos dimensiones para estudiar su comportamiento cuando cambiemos los materiales de los que están contruidos. El estudio de estos comportamientos con modelos previos nos aportará información para el diseño final, pero también nos ayudará a conseguir habilidad y destreza con el manejo del programa.

En los capitulos donde de muestran las simulaciones, se trabajará con el modelo de la figura 4.2. La imagen muestra un mecanismo que se asemeja al diseño final. No tiene las medidas reales, pero será de ayuda para estudiar el comportamiento del embrague cuando sus componentes esten sometidos a un campo magnético.

El mecanismo está formado por un eje de entrada, el cual a través del fluido MR transmite el par de torsión al eje de salida. El fluido se encuentra entre la parte más ancha del eje de salida y su respectiva tapa. En su interior se encuentra un disco delgado que forma parte del eje de entrada.

La bobina envuelve la zona donde se encuentra el fluido MR. Se ha aprovechado la simetría del mecanismo para simplificar y facilitar la simulación.

Componentes del embrague como un mecanismo de revolucion alrededor del eje z.

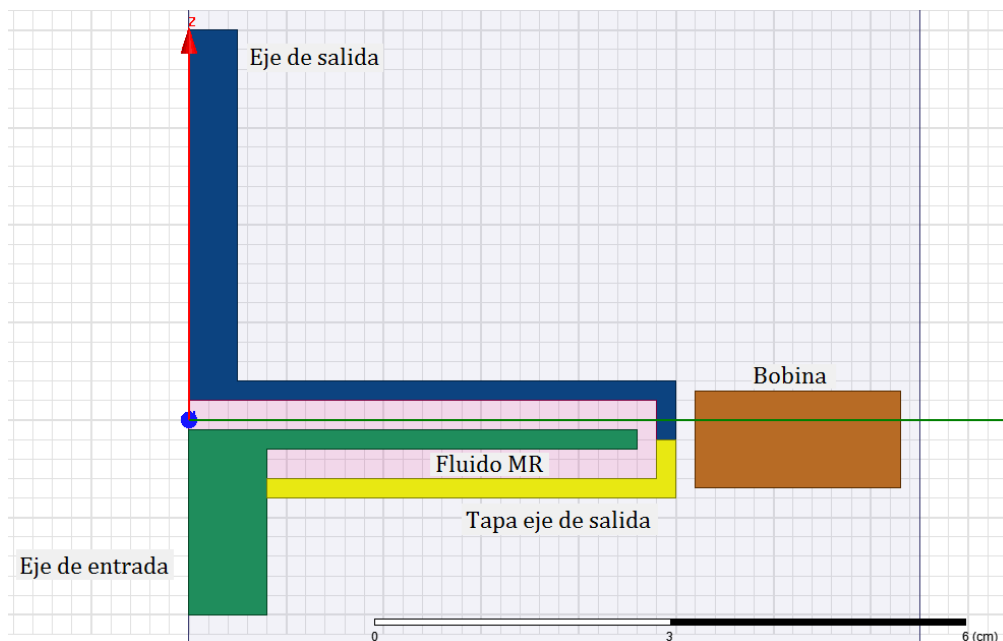


Figura 4.2 Diseño de embrague propuesto. 2D.

4.2 Modelos previos de la Geometría del Embrague. 3D.

De igual manera se ha elaborado un modelo en 3D semejante al modelo final, éste diseño tampoco tiene las medidas necesarias, pero al igual que con dos dimensiones, nos permitirá trabajar tanto las simulaciones con los distintos materiales como en la manejo del simulador.

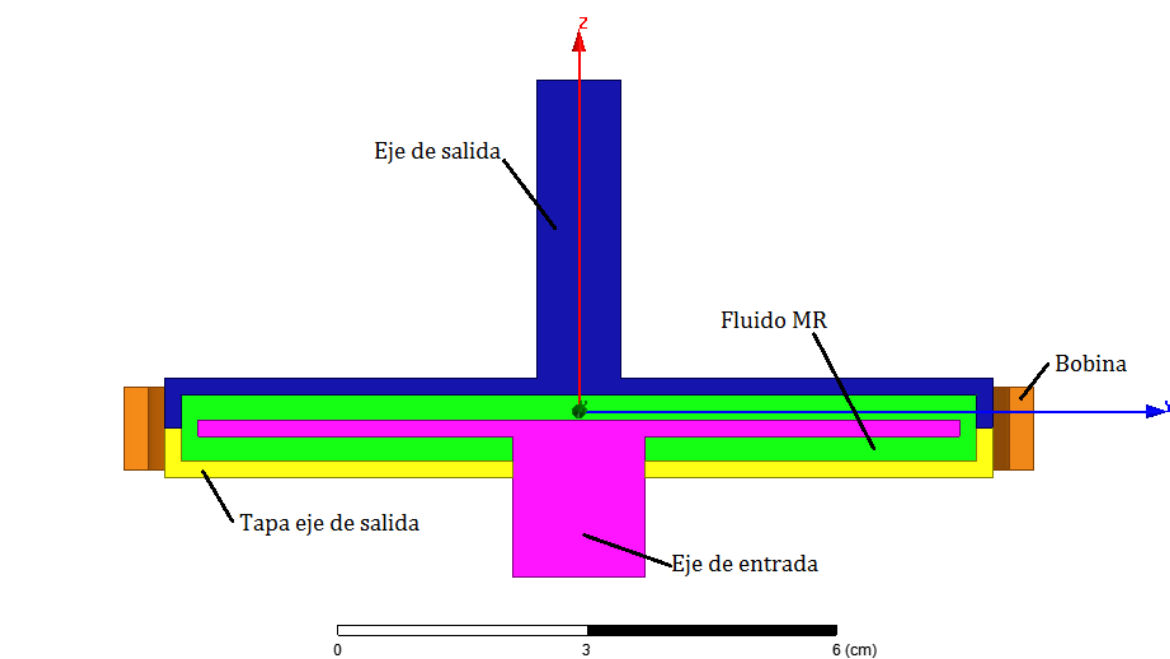


Figura 4.3 Diseño de embrague propuesto. 3D.

El mecanismo está formado por un eje de entrada, el cual a través del fluido MR transmite el par de torsión al eje de salida. El fluido se encuentra entre la parte más ancha del eje de salida y su respectiva tapa. En su interior se encuentra un disco delgado que forma parte del eje de entrada.

En la figura 4.3 podemos observar como el disco del eje de entrada se encuentra en el seno del fluido MR para transmitir el par cuando es sometido al campo magnético creado por la bobina que lo envuelve.

Todas las medidas y geometría de este diseño son aproximadas al del modelo final, pero el concepto y criterio del funcionamiento es el mismo.

La figura 4.4 muestra una sección del conjunto del embrague con la bobina, se puede observar claramente la ubicación de todos sus componentes.

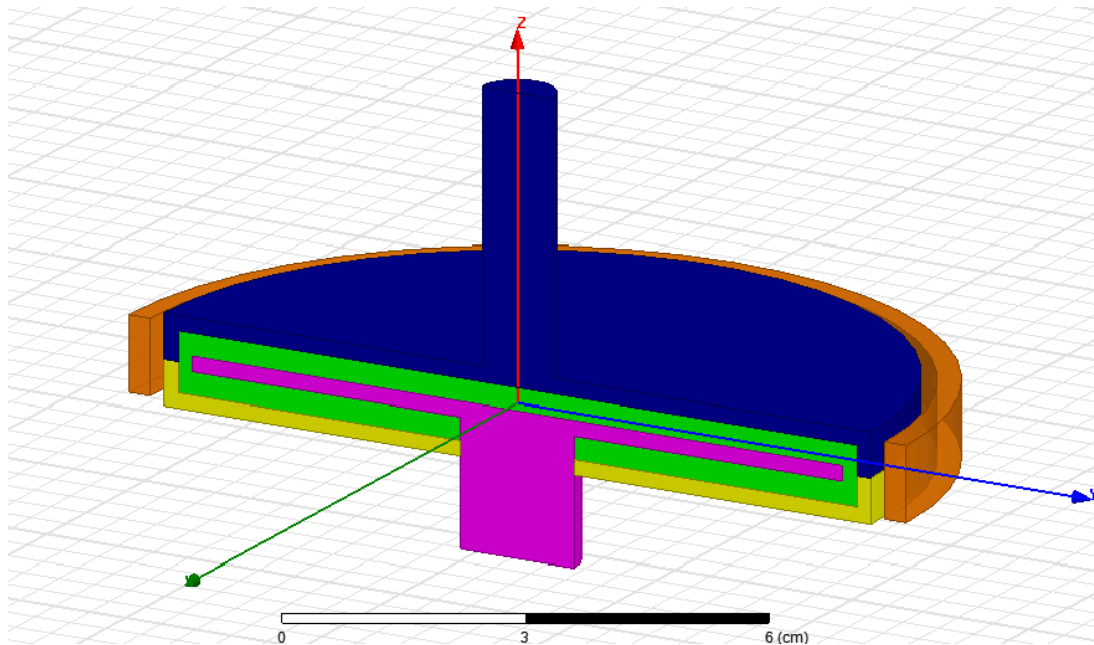


Figura 4.4 Sección del embrague.

La figura 4.5 muestra las vistas del conjunto en tres dimensiones, el fluido y el disco delgado del eje de entrada se encuentran encerrados dentro de la cavidad que se crea al unir el eje de salida y su respectiva tapa.

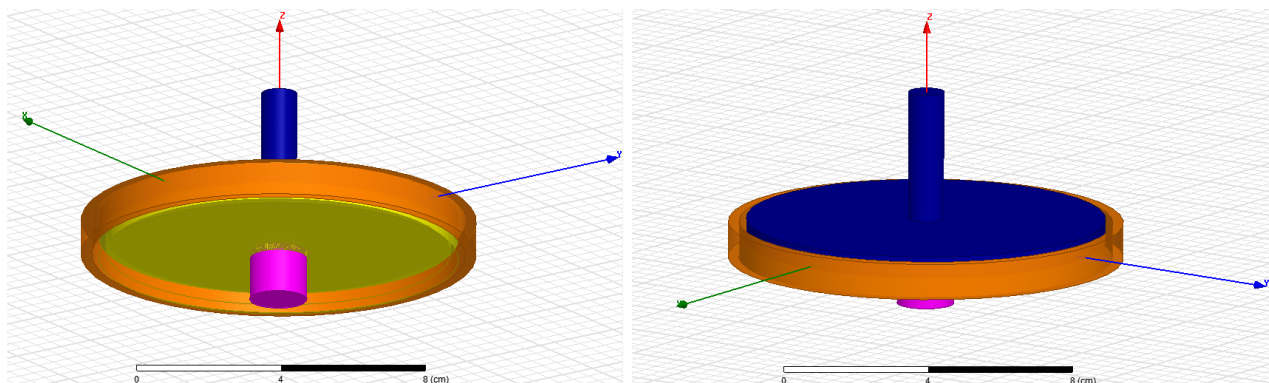


Figura 4.5 Vistas de todo el conjunto en 3D.

4.3 Importación de la Geometría real del Embrague.

El mecanismo se encuentra construido, conocemos sus medidas y características. En este apartado se muestran las partes del embrague y la forma de acoplamiento de cada una de ellas.

El dispositivo se encuentra en la junta que une a la articulación del mecanismo de rehabilitación. Figura 4.6.

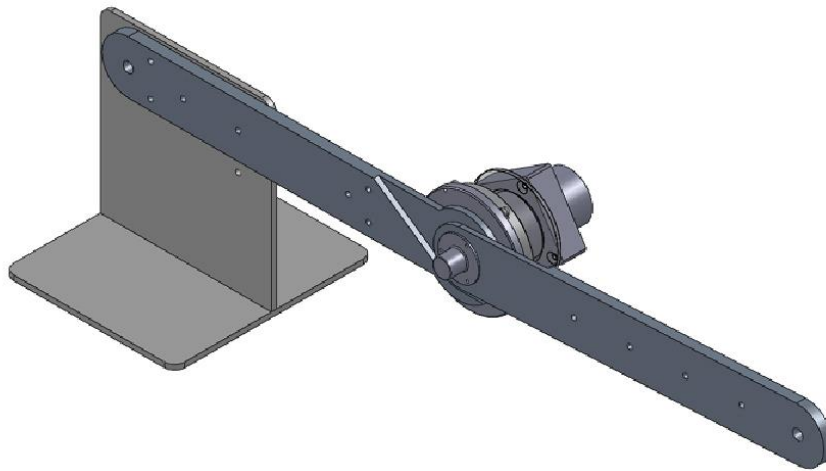


Figura 4.6 Esquema del mecanismo completo.

El embrague consta de una carcasa que soporta el bobinado, esta carcasa envuelve a los ejes de entrada y salida que contienen el fluido magnetoreológico de modo que el efecto del campo magnético inducido por la bobina contenga en su totalidad al fluido.

El dispositivo está compuesto de las siguientes partes:

- Carcasa inferior.
- Carcasa superior.
- Eje de entrada.
- Eje de salida.
- Tapa del eje de salida.

4.3.1 Carcasas Superior e Inferior.

La figura 4.7 y 4.8 muestran una imagen de las carcasas superior e inferior de embrague. En el espacio que forman cuando esten unidas es donde irá colocada la bobina.

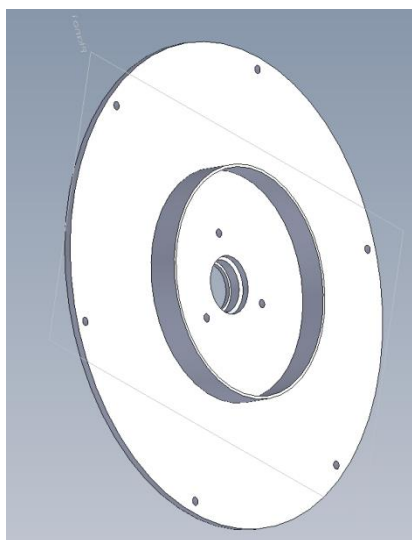


Figura 4.7 Carcasa inferior.

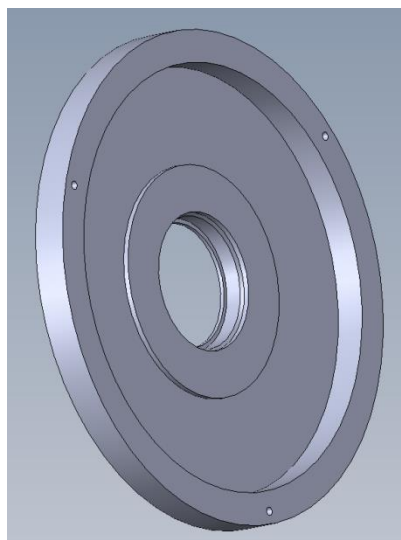


Figura 4.8 Carcasa superior.

4.3.2 Eje de Entrada.

El eje de entrada está en contacto con el motor y con el fluido magnetoreológico.

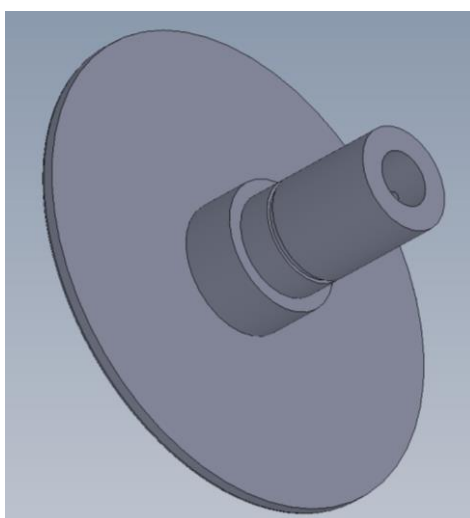


Figura 4.9 Eje de Entrada.

4.3.3 Eje de Salida.

Al igual que el eje de entrada, está en contacto con el fluido magnetorológico, y cuando éste se encuentra magnetizado, gira solidariamente con el eje de entrada cuando el motor está accionado.

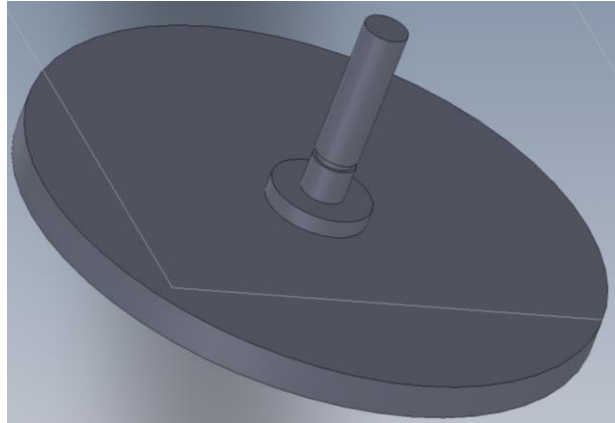


Figura 4.10 Eje de salida.

4.3.4 Tapa eje de Salida.

Cubre al eje de salida, se encuentra en contacto con el fluido y también gira con el conjunto anterior.

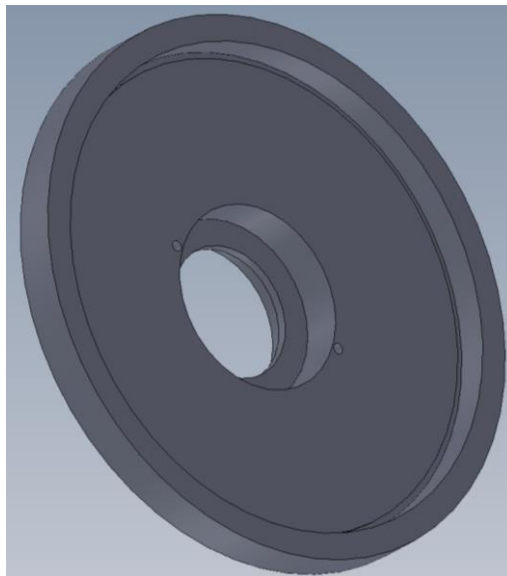


Figura 4.11 Tapa eje de salida.

4.3.5 Geometría del Embrague Completo.

En las siguientes imágenes, figura 4.12 figura 4.13, se muestra el conjunto de todas las piezas del mecanismo con la geometría real.

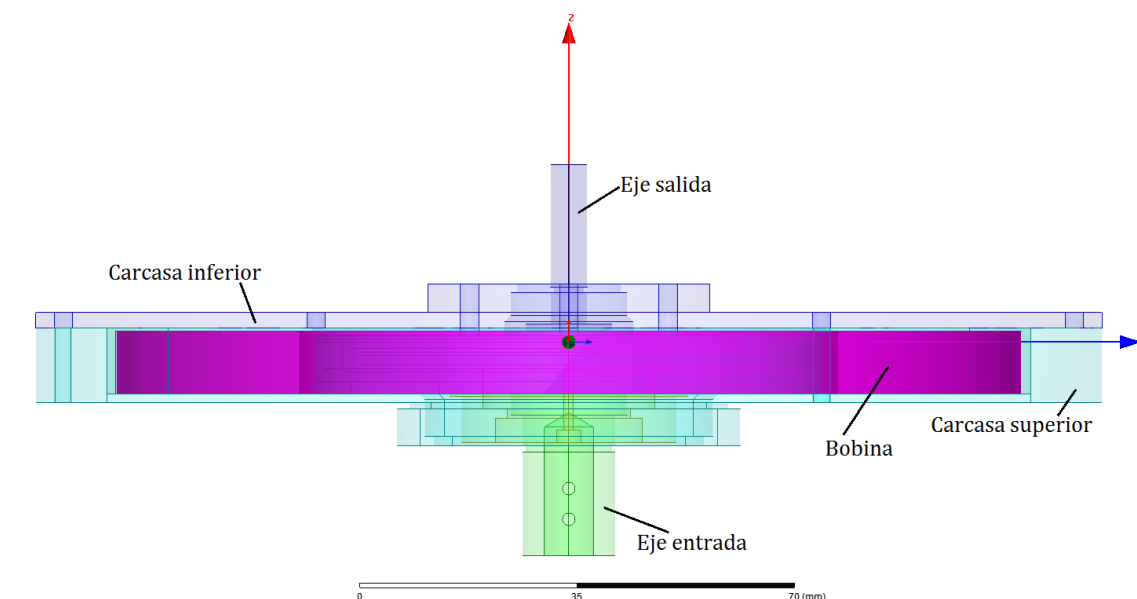


Figura 4.12 Montaje del embrague con todas sus partes.

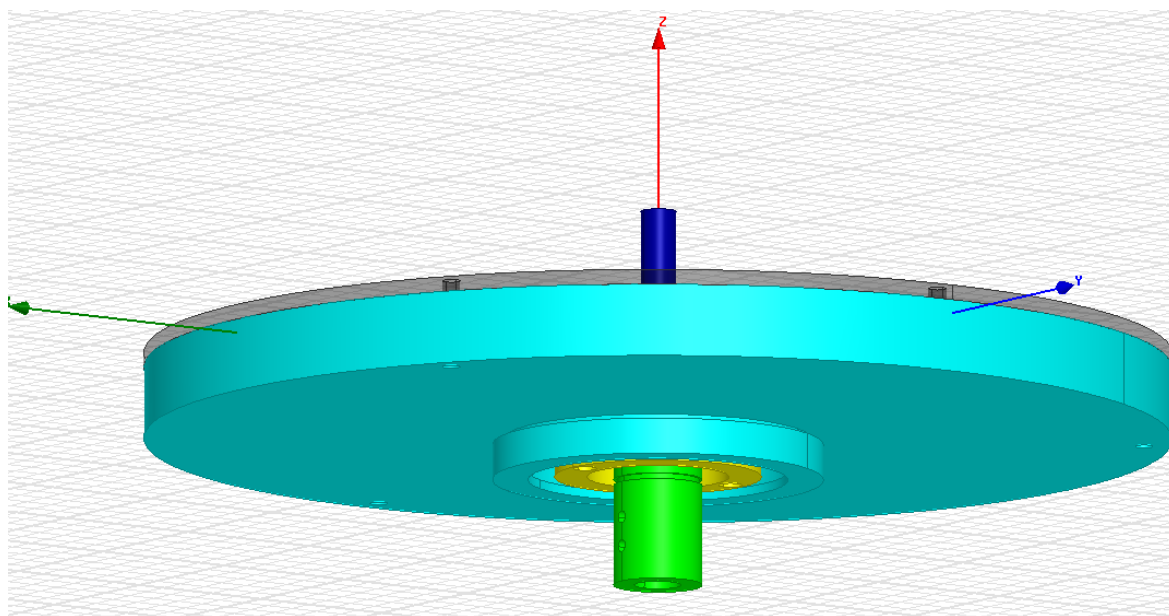


Figura 4.13 Vista exterior del mecanismo.

4.3.6 Funcionamiento del mecanismo completo.

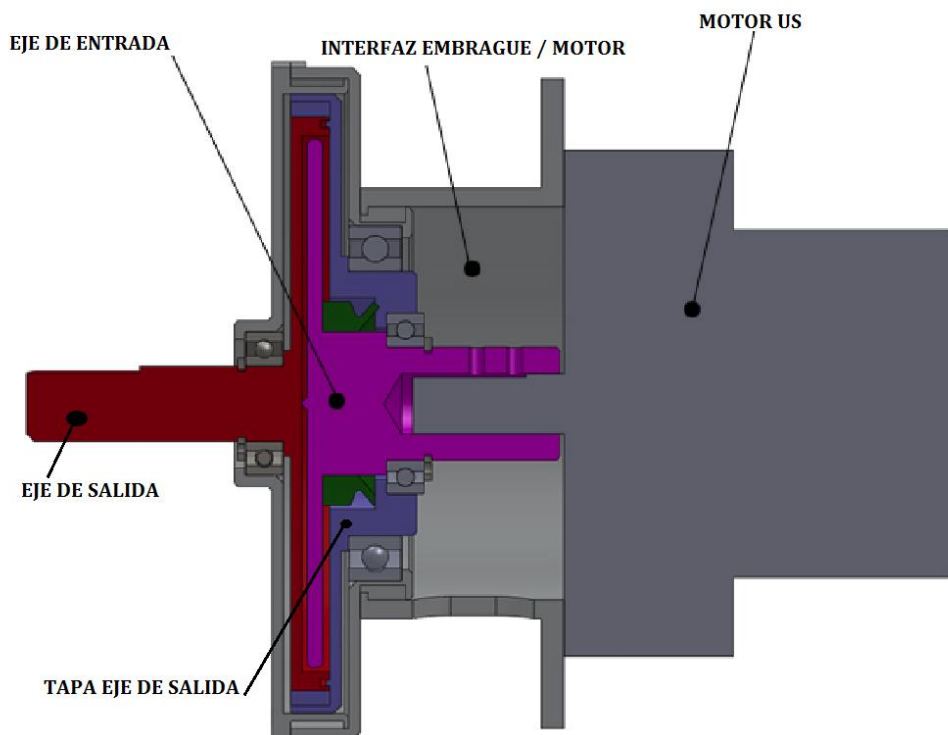


Figura 4.14 Sección de la junta.

En la figura 4.14 se muestra la sección de la junta del mecanismo de rehabilitación donde se puede observar con detalle la disposición de todas las piezas incluido el motor y la interfaz.

El motor se encuentra en contacto con el eje de entrada, y dependiendo de las necesidades en cada momento, necesitaremos transmitir el par de torsión al eje de salida.

Para transmitir el movimiento disponemos del fluido MR, el cual, cuando se encuentra en el seno de un campo magnético cambia sus propiedades físicas.

El eje de entrada posee un disco que se encuentra en contacto con el fluido, de modo que cuando está sometido al campo magnético, el eje de entrada gira solidariamente con el eje de salida gracias al contacto con el fluido magnetoreológico.

La gran ventaja de utilizar este tipo de fluidos en estas aplicaciones es la velocidad de respuesta del compuesto cuando se producen cambios en las condiciones iniciales.

CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE MATERIALES. SIMULACIONES.

En este apartado se estudiarán materiales con los que se pueden construir las diferentes partes del mecanismo, estudiaremos las simulaciones que se realicen principalmente con hierro y aluminio como tipos de materiales. Trabajaremos con los modelos con dimensiones aproximadas en 2D y 3D, así como con el diseño importado.

5.1 Modelos previos de la geometría del embrague. 2D.

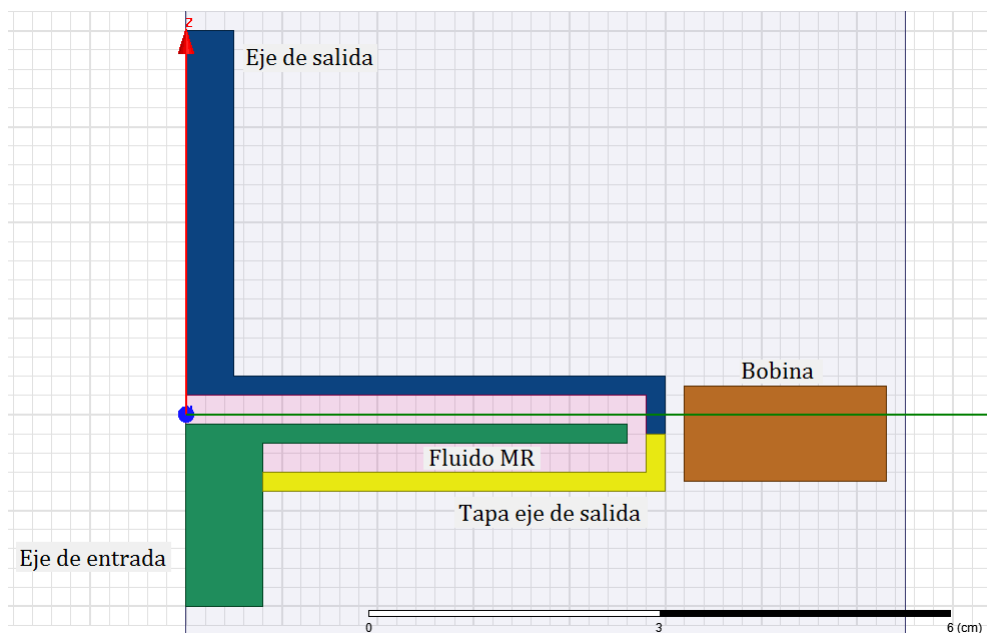


Figura 5.1 Diseño de embrague propuesto en 2D.

5.1.1 Cálculos previos.

Realizaremos cálculos teóricos antes de realizar las simulaciones para contrastar los resultados que obtengamos de ellas. Como se ha explicado anteriormente, se estudiara los resultados del embrague construido con aire, aluminio y hierro.

Para la realización de esta parte nos basaremos en los fundamentos teóricos expuestos en capítulos anteriores.

La siguiente figura muestra las medidas del embrague y de la bobina, necesarias para la realización de este apartado.

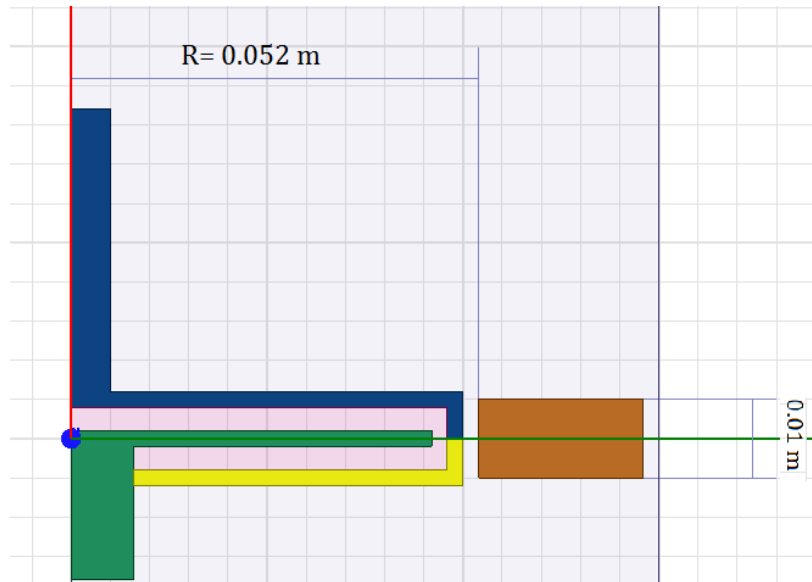


Figura 5.2 Diseño de embrague propuesto en 2D.

Cálculo del campo magnético creado por una bobina.

Todos los datos necesarios para los cálculos realizados son aproximaciones al del modelo final. En el capítulo 6 se realizarán simulaciones y cálculos del modelo real.

El simulador nos permite introducir el producto (**NI**) del número de vueltas de la bobina, **N**, por la corriente que circula por el conductor, **I**. Dejando a nuestra consideración el poder elegir la corriente en función de las vueltas de bobinado que necesitemos o viceversa.

DATOS

$$R = 0.052 \text{ m} \qquad z_2 = \frac{L}{2} = 0.005 \text{ m}$$

$$L = 0.01 \text{ m} \qquad z_1 = -\frac{L}{2} = -0.005 \text{ m}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad \text{Vs/Am}$$

$$NI = 500 \text{ A vuelta}$$

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{NI}{L} \left(\frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + R^2}} - \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + R^2}} \right)$$

Sustituyendo.

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{500}{0.01} \left(\frac{0.005}{\sqrt{0.005^2 + 0.052^2}} + \frac{0.005}{\sqrt{-0.005^2 + 0.052^2}} \right)$$

$$B_z = 6.01 \times 10^{-3} \text{ Teslas}$$

Según la disposición que se ha dado al diseño, el campo magnético resultante es paralelo al eje z positivo. Este resultado debemos verificarlo en las simulaciones sucesivas.

5.1.2 Simulaciones con aire.

La primera simulación se realizará con la bobina como fuente del campo magnético y todos los componentes del embrague construidos con aire. Esto nos permite comprobar que los resultados que nos ofrece el simulador coinciden con los datos previamente calculados.

En la ventana de modelado de Maxwell observamos que todas las partes del embrague con excepción de la bobina están construidas con aire (air). La bobina está construida con cobre (copper).

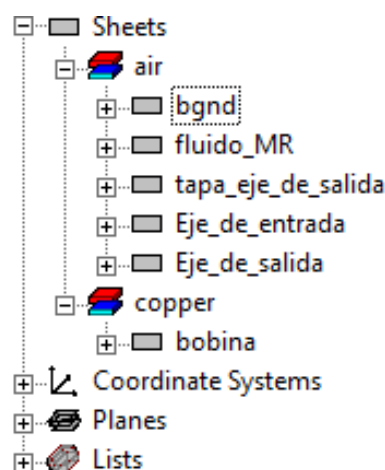


Figura 5.3 Configuración del embrague con aire.

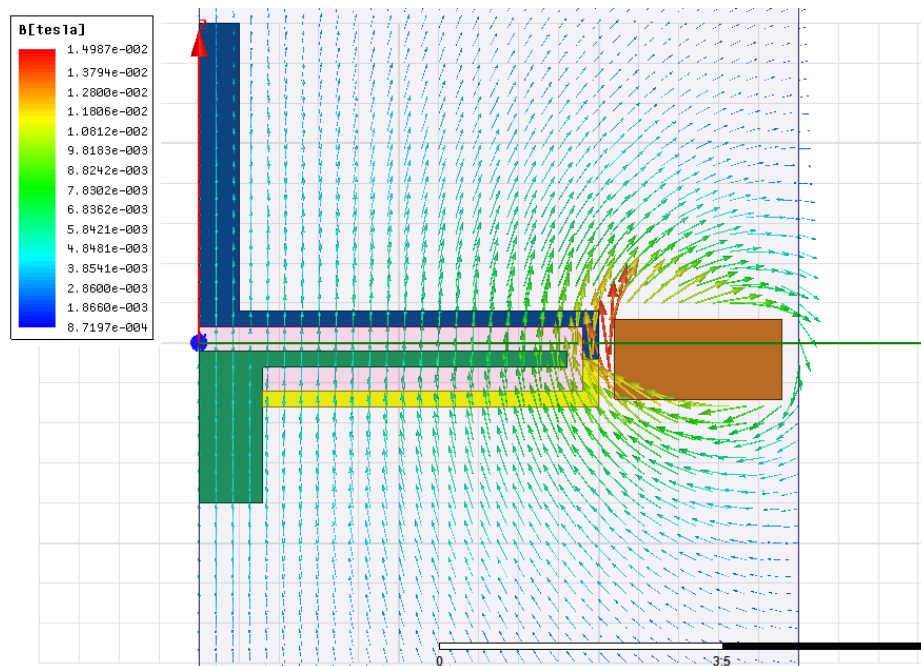


Figura 5.4 Líneas de campo magnético en el espacio de trabajo (Aire).

En la figura 5.4 se muestra la simulación realizada con los parámetros antes mencionados. Observamos las líneas de campo que crea la bobina así como los valores en la tabla que lo acompaña.

Del mismo modo que podemos visualizar las líneas de campo y su valor del todo el conjunto, podemos también escoger que parte nos interesa para su estudio, y mostrarla.

Como ejemplo vamos a mostrar las líneas de campo que se crean en el fluido MR.

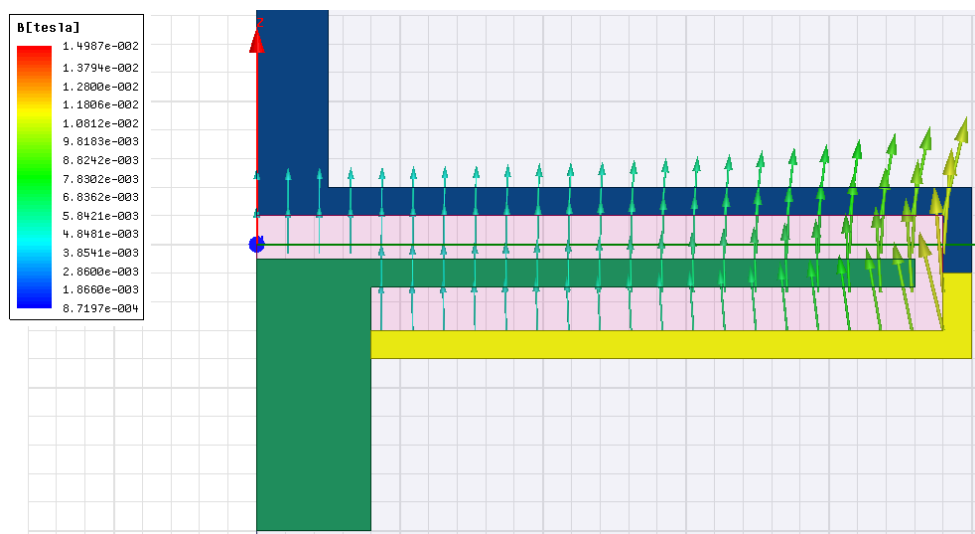


Figura 5.5 Líneas del campo magnético en el fluido MR.

Al ser todos sus componentes aire, el valor del campo magnético en el interior de la bobina, no cambia su valor.

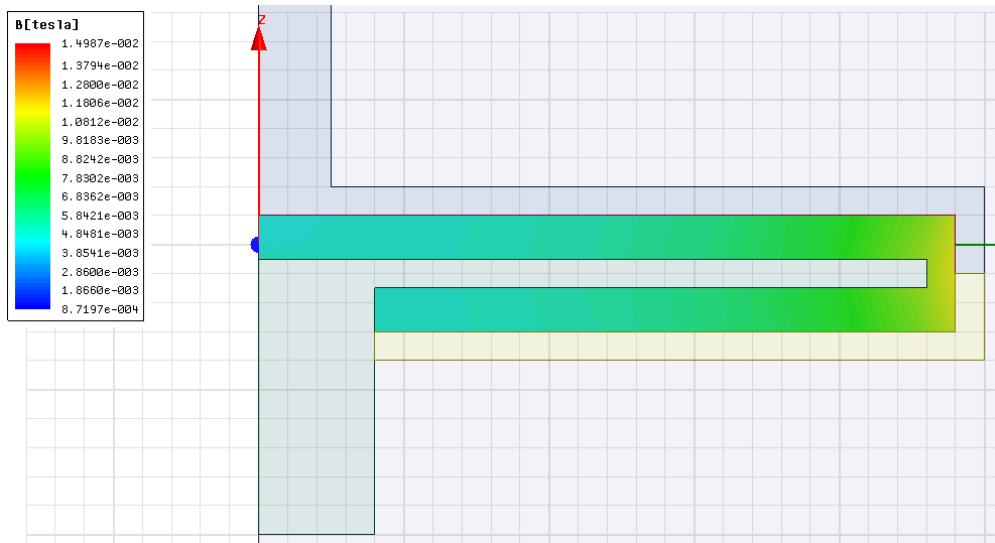


Figura 5.6 Magnitud del campo magnético en el fluido MR.

La Figura 5.6 muestra la magnitud del campo magnético a través del fluido MR. De igual manera que podemos elegir qué líneas de campo queremos visualizar, podemos elegir también, la magnitud del campo magnético de cualquier componente. En la tabla de la imagen se puede observar que en el rango de los resultados numéricos que nos da la simulación se encuentra el resultado calculado anteriormente.

5.1.3 Simulaciones con aluminio.

Es interesante el estudio del aluminio como material de construcción por ser un elemento ligero, y para la elaboración del embrague éste es un aspecto fundamental para su diseño. Además, al ser la permeabilidad magnética del aluminio prácticamente igual a la unidad, las líneas del campo magnético atravesarán su estructura.

En la ventana de modelado de Maxwell observamos que el eje de salida, el eje de entrada y la tapa del eje de salida están compuestas de aluminio (aluminum), el fluido seguirá siendo aire (air), y la bobina de cobre (copper). Figura 5.7.

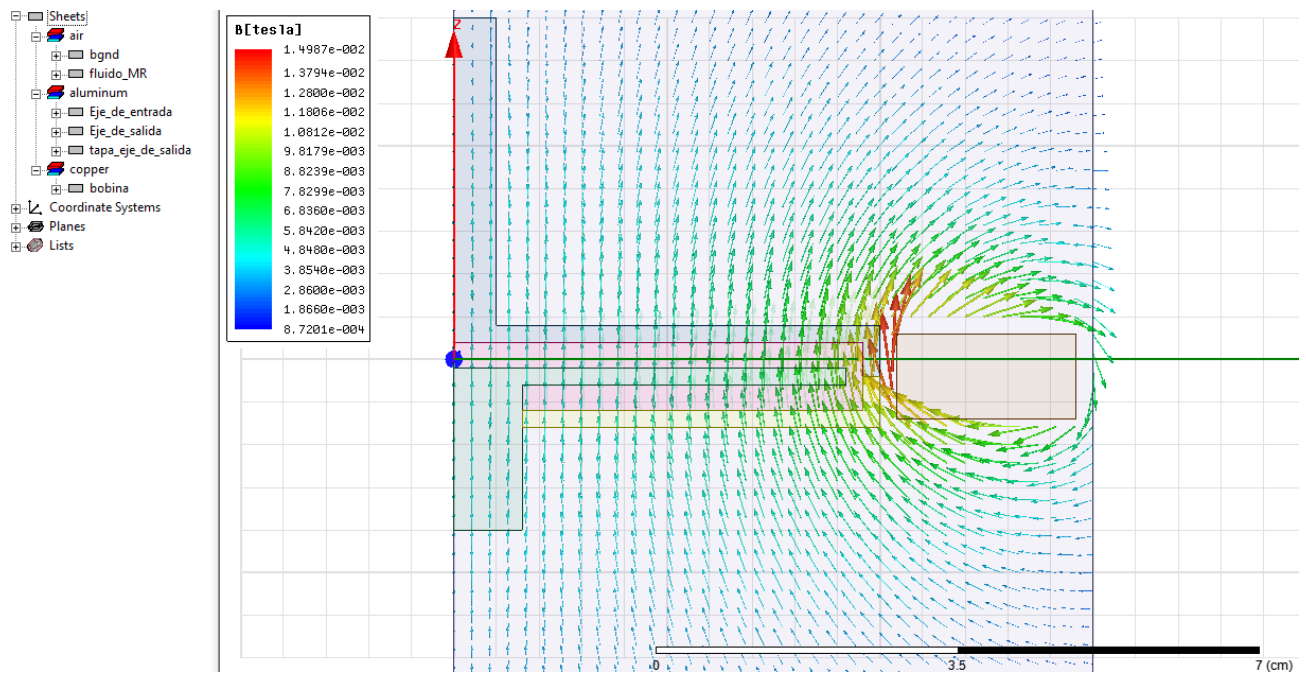


Figura 5.7 Líneas de campo magnético en el espacio de trabajo (Aluminio).

En comparación con los resultados de la simulación del campo magnético creado por la bobina cuando hay aire en su interior, podemos observar que no se producen cambios apreciables en los valores de **B**. Como se ha explicado anteriormente, esto se debe al valor de la permeabilidad magnetica del aluminio.

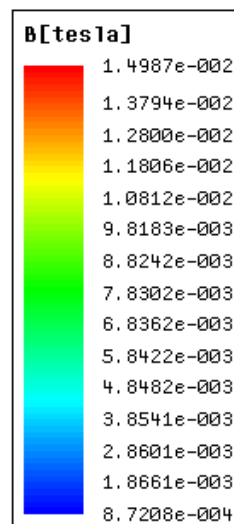


Figura 5.8 Resultados numéricos de la simulación con aluminio.

Líneas de campo a través del fluido en la simulacion en 2D.

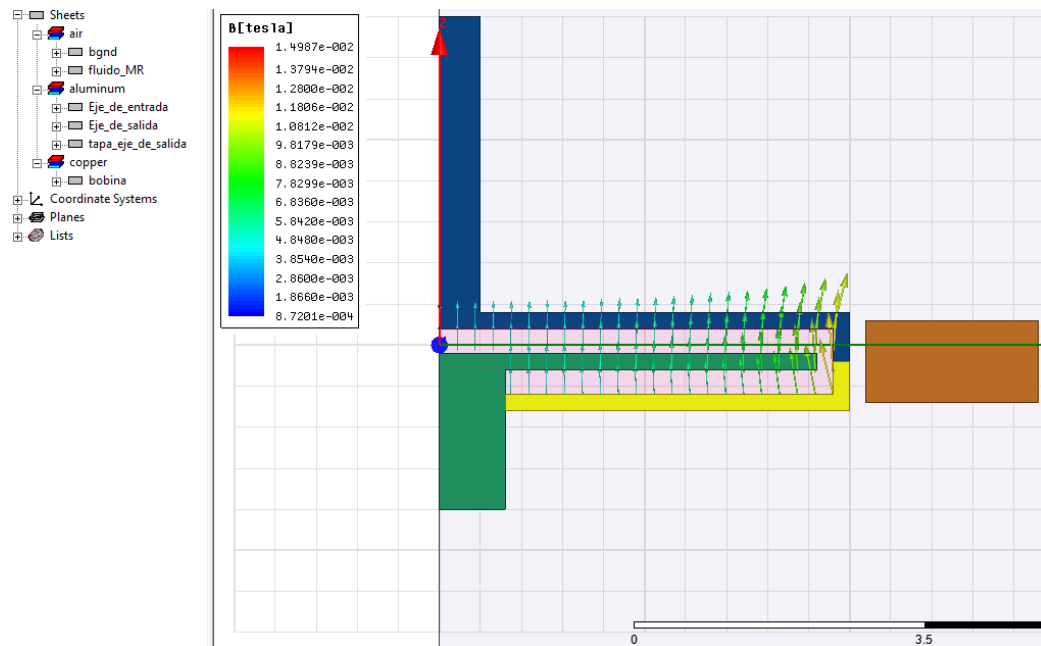


Figura 5.9 Líneas de campo a través del fluido MR.

Magnitud de B en el fluido MR, se puede observar que su intensidad disminuye a medida que nos alejamos de la bobina. Figura 5.10.

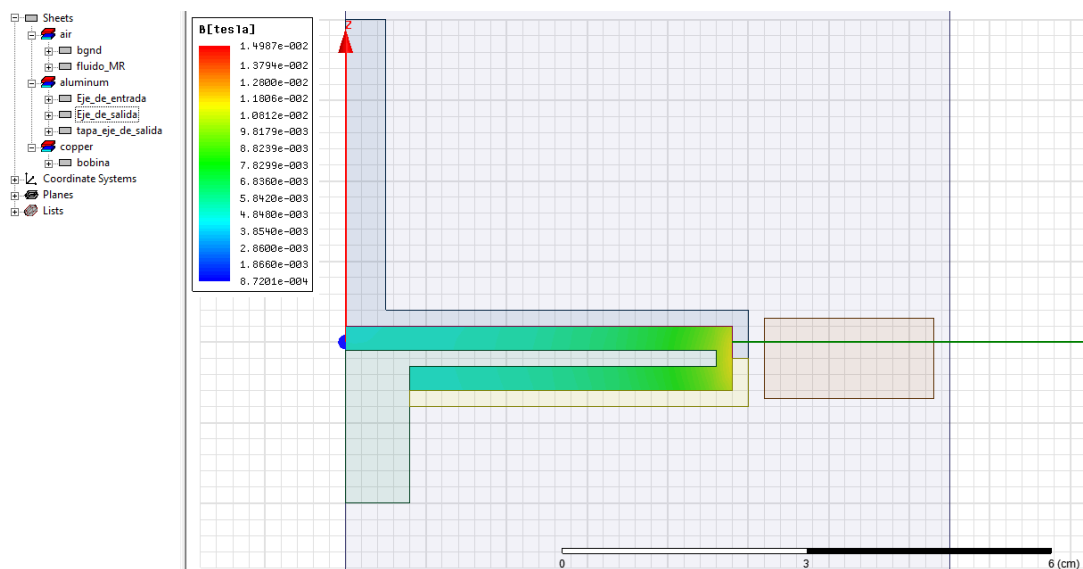


Figura 5.10 Magnitud del campo magnético en el fluido MR.

En la figura 5.11 se observa como el campo atraviesa las piezas de mecanismo. En la figura 5.12 se muestra la intensidad del campo en cada una de las piezas.

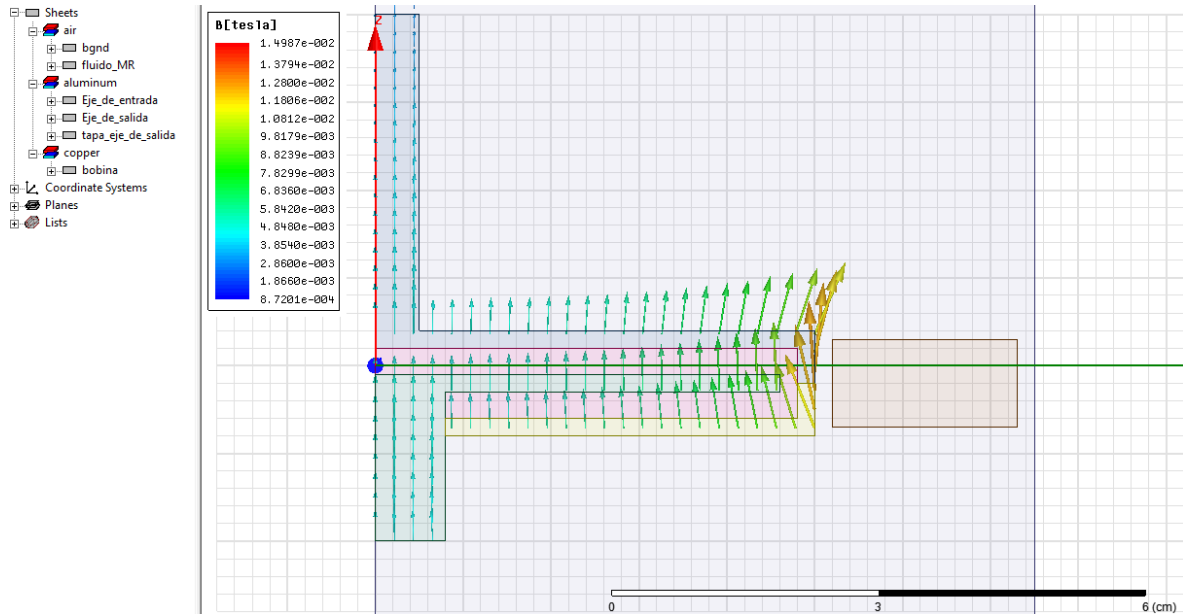


Figura 5.11 Líneas de campo magnético a través del aluminio.

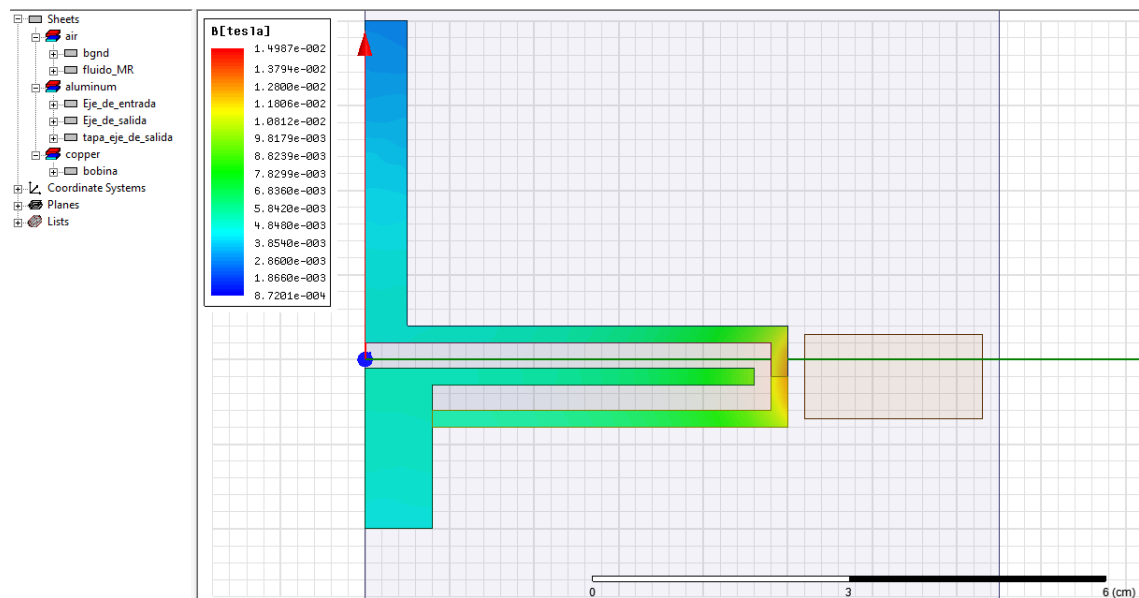


Figura 5.12 Magnitud del campo magnético en el interior de las piezas.

5.1.4 Simulaciones con hierro

Es interesante el estudio del comportamiento del hierro al definirlo como material de construcción. Es mas pesado de que el aluminio y su constante de permeabilidad magnetica es significativamente mayor.

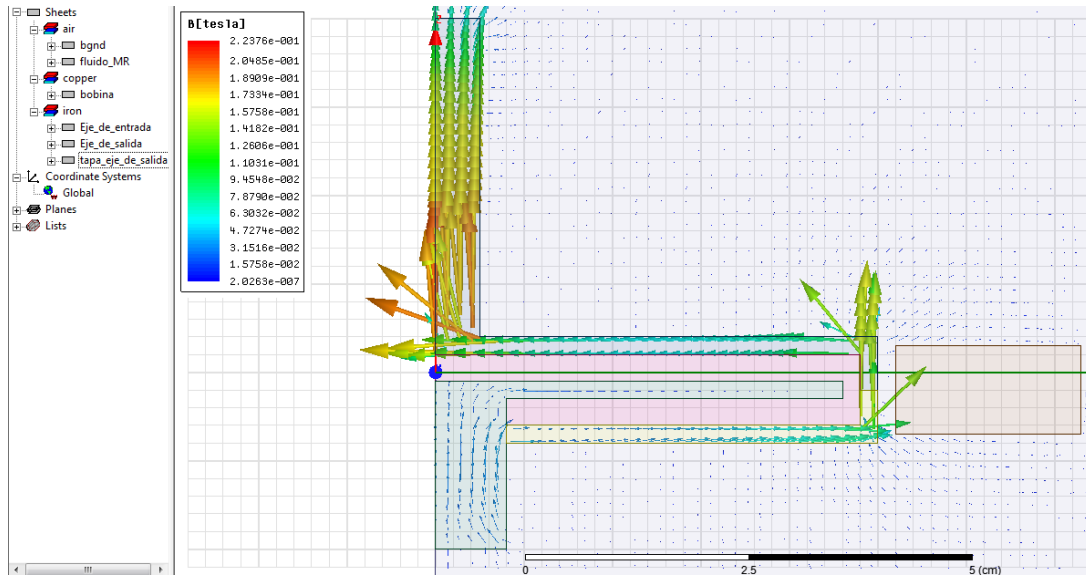


Figura 5.13 Líneas de campo magnético en el espacio de trabajo (Hierro).

En la figura 5.13 se muestra el resultado de la simulación con las piezas construidas con hierro, en la imagen se pueden ver la dirección y sentido del campo magnético creado por la bobina en todo el espacio de trabajo.

Los valores numéricos de la simulación nos muestran valores distintos a los de las simulaciones anteriores. Esto se debe a que el campo magnético recorre las piezas de mecanismo en lugar de atravesarlas, y al hacerlo magnetiza ligeramente al fluido MR. Figura 5.14.

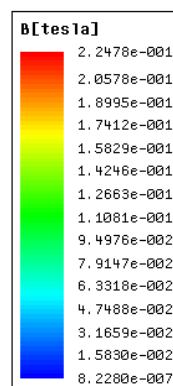


Figura 5.14 Resultados numéricos de la simulación con hierro.

Tanto en la figura 5.15 como en la figura 5.16 muestran los resultados de la simulación únicamente en las piezas del mecanismo. Se puede observar como las líneas de campo magnético fluyen por interior del material, intensificándose en las secciones más estrechas de su geometría.

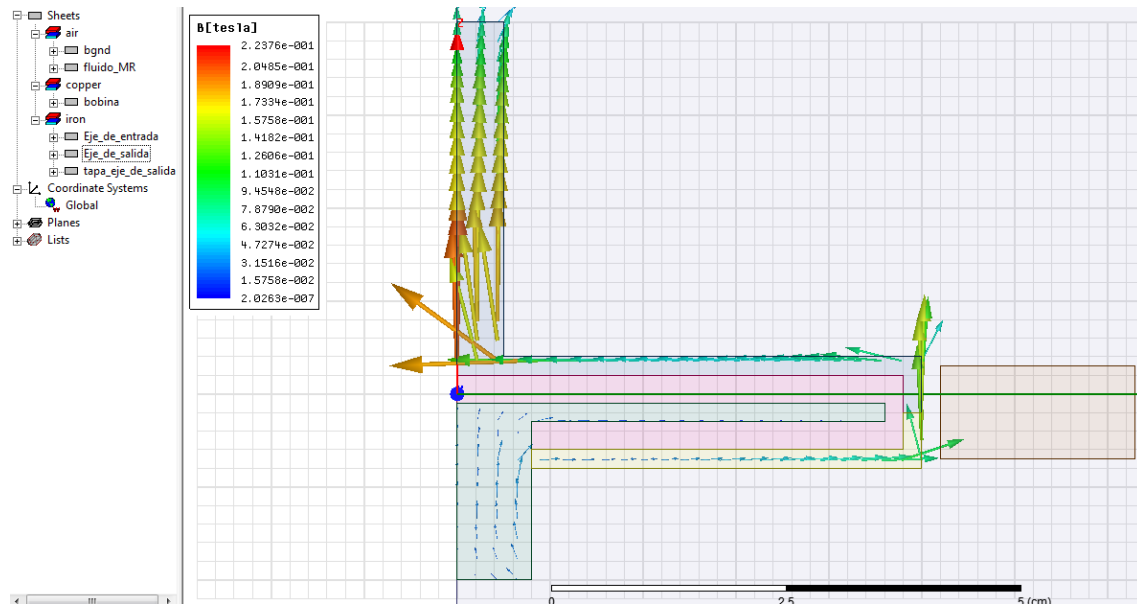


Figura 5.15 Simulación del embrague construido con aluminio.

La orientación de las líneas de campo magnético es muy diferente a las que nos proporcionó la simulación cuando las piezas estaban construidas con aluminio.

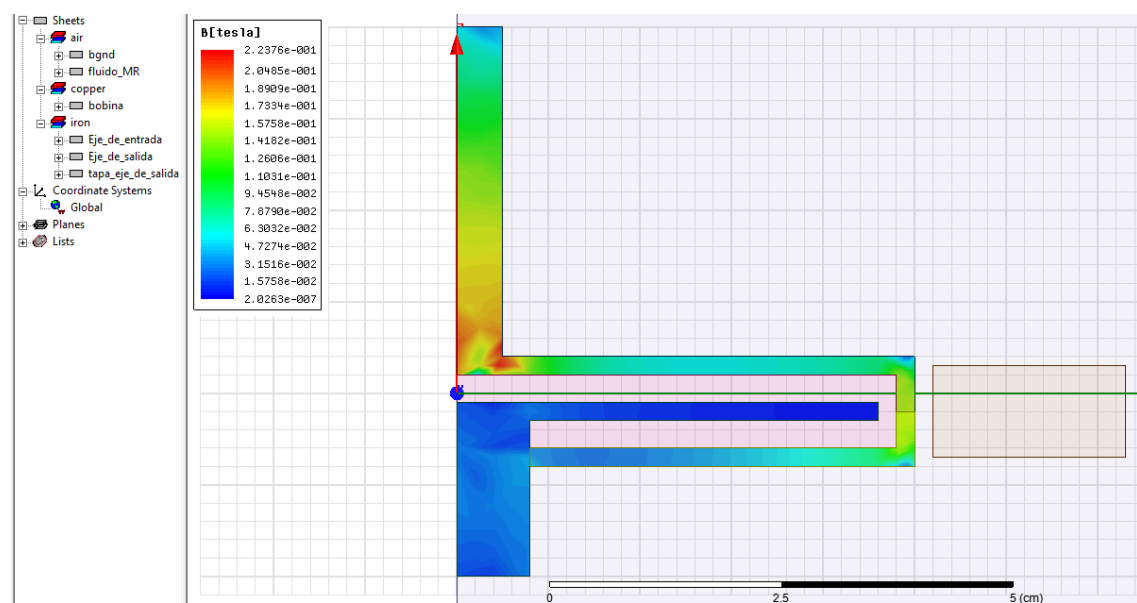


Figura 5.16 Simulación del embrague construido con aluminio.

Finalmente tenemos los resultados cuando enfocamos nuestro interés el fluido MR. La simulación muestra que la zona donde reposa el fluido está ligeramente magnetizada y sus valores numéricos son muy pequeños en comparación con el valor en otros puntos del espacio de trabajo.

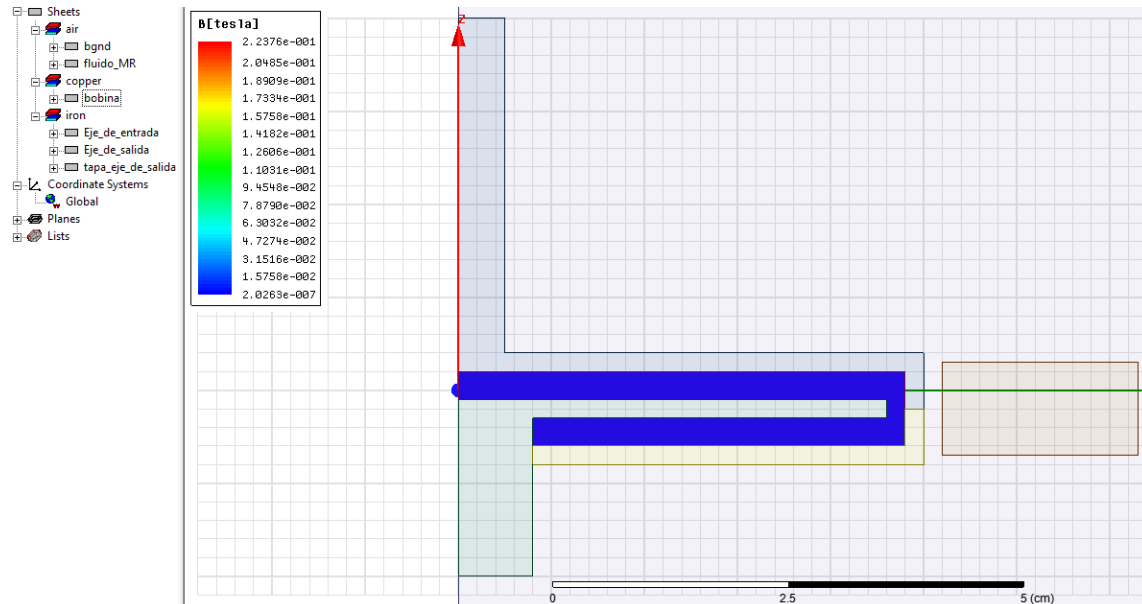


Figura 5.17 Magnitud del campo magnético en el fluido MR.

Teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones realizadas con distintos materiales, podemos concluir que la construcción del mecanismo debería realizarse con aluminio, ya que el campo magnético atraviesa su estructura y permite una mejor magnetización de la zona donde está alojado el fluido MR. Sin embargo al construirlo con hierro, las líneas de campo magnético recorren el material, dejando la zona del fluido sin magnetizar como la necesitamos.

5.2 Modelos previos de la geometría del embrague. 3D.

De las simulaciones realizadas en 2D, podemos concluir, que la utilización del hierro como material de composición del embrague, no es viable. Las líneas de campo magnético fluyen a través del material y por ello no se puede conseguir una adecuada magnetización del fluido MR.

En este apartado se realizara simulaciones con aluminio como material de construcción. El entorno de trabajo será en 3D, se estudiará el comportamiento del campo magnético en todos sus componentes.

5.2.1 Cálculos previos.

Las condiciones de la simulación son las mismas que el realizado en el diseño en 2D. Es decir, tanto el valor del producto **NI**, como las medidas geométricas necesarias para el cálculo de **B** son idénticas al utilizado anteriormente.

DATOS

$$R = 0.052 \text{ m}$$

$$z_2 = \frac{L}{2} = 0.005 \text{ m}$$

$$L = 0.01 \text{ m}$$

$$z_1 = -\frac{L}{2} = -0.005 \text{ m}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Vs/Am}$$

$$NI = 500 \text{ A vuelta}$$

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{NI}{L} \left(\frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + R^2}} - \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + R^2}} \right)$$

Sustituyendo.

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{500}{0.01} \left(\frac{0.005}{\sqrt{0.005^2 + 0.052^2}} + \frac{0.005}{\sqrt{-0.005^2 + 0.052^2}} \right)$$

$$B_z = 6.01 \times 10^{-3} \text{ Teslas}$$

5.2.2 Simulaciones con aluminio en 3D.

Al igual que en el diseño anterior, asignamos a cada pieza del mecanismo su respectivo material.

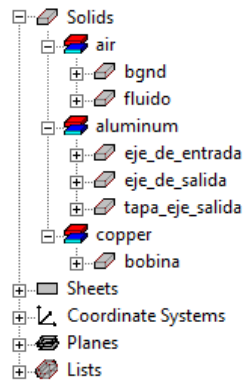


Figura 5.18 Asignación de materiales al modelo en 3D.

Una vez realizada la simulación en 3D comparemos los resultados obtenidos con los cálculos teóricos y con los resultados de la simulación del modelo en 2D cuando utilizamos el aluminio para construir el embrague.

La siguiente figura (figura 5.19) muestra la dirección y el sentido del campo magnético creado por la bobina cuando circula corriente por su interior.

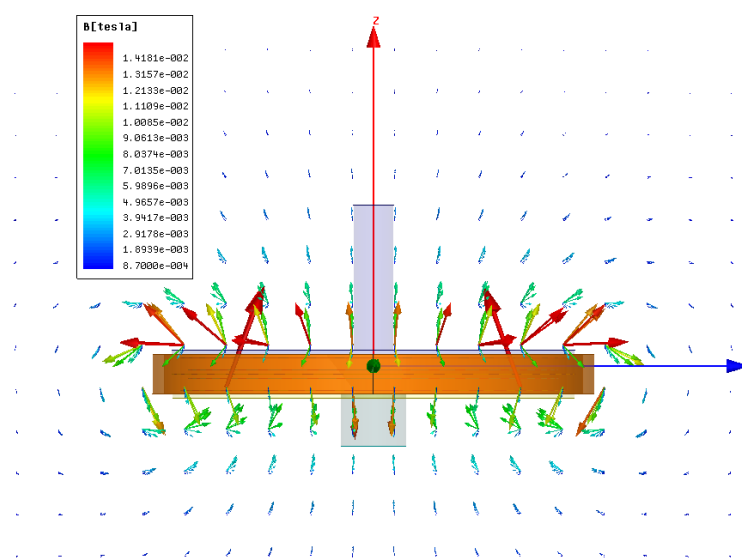


Figura 5.19 Líneas de campo creadas por la bobina vistas en 3D.

Podemos comprobar que el resultado obtenido teóricamente se encuentra dentro del rango de valores que se muestra como resultado de la simulación.

Resultado teórico:

$$B_z = 6.01 \times 10^{-3} \text{ Teslas}$$

Rango de resultados una vez realizada la simulación:

$$B: [5.98 \times 10^{-3}, \quad 9.06 \times 10^{-3}] \text{ Teslas}$$

El rango de resultados con los que comparamos los resultados teóricos son los que pertenecen a **B** en el interior de la bobina.

En la figura 5.20 se observa que los vectores en color verde corresponden al campo magnético creado en el interior del enrollamiento. El resto de resultados corresponden a valores de **B** en el resto del entorno de trabajo, y como era de esperar el campo es más intenso en las proximidades de la bobina que cuando nos alejamos de ella.

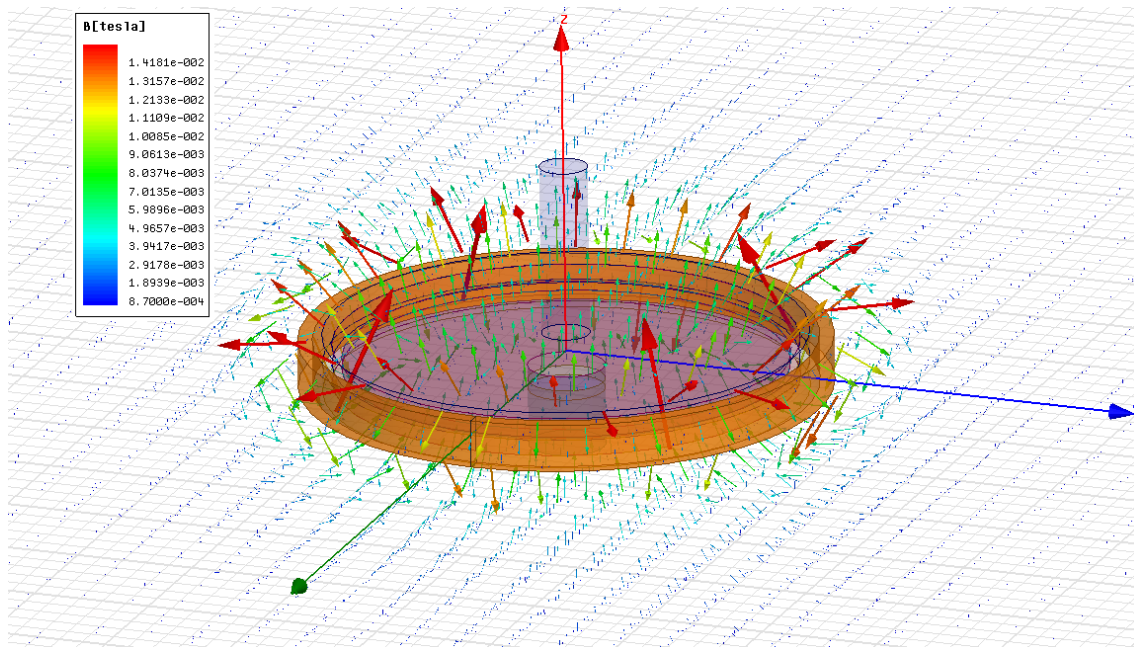


Figura 5.20 Orientación de los vectores **B** en el espacio.

Las siguientes imágenes muestran como las líneas de campo atraviesan el material, de este modo el fluido MR que se encuentra en su interior recibe las líneas de campo magnético de forma perpendicular a la superficie ocupada.

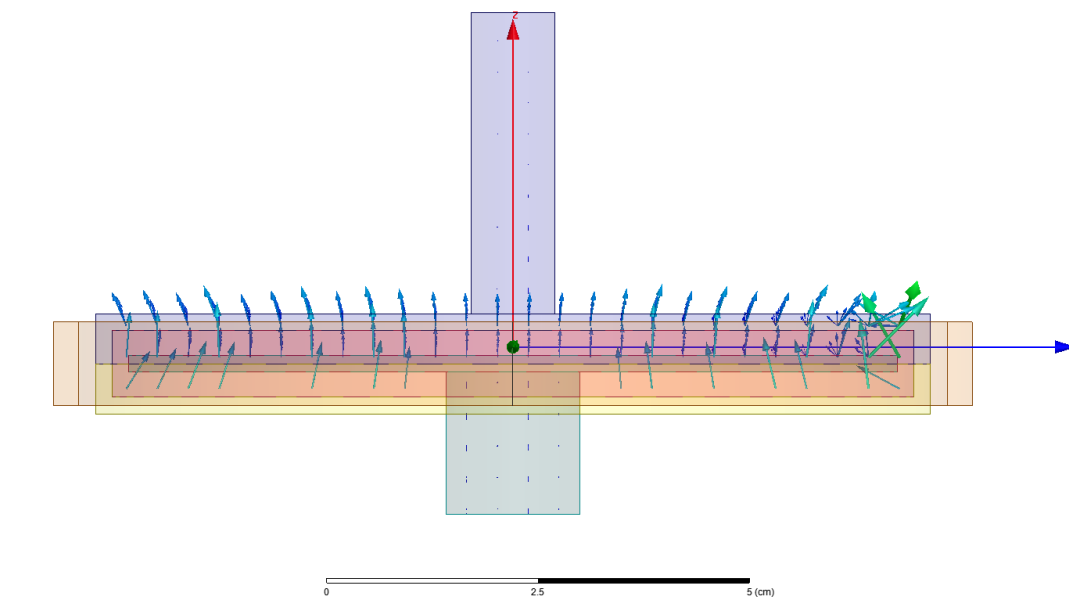


Figura 5.21 Líneas de campo B a través del aluminio.

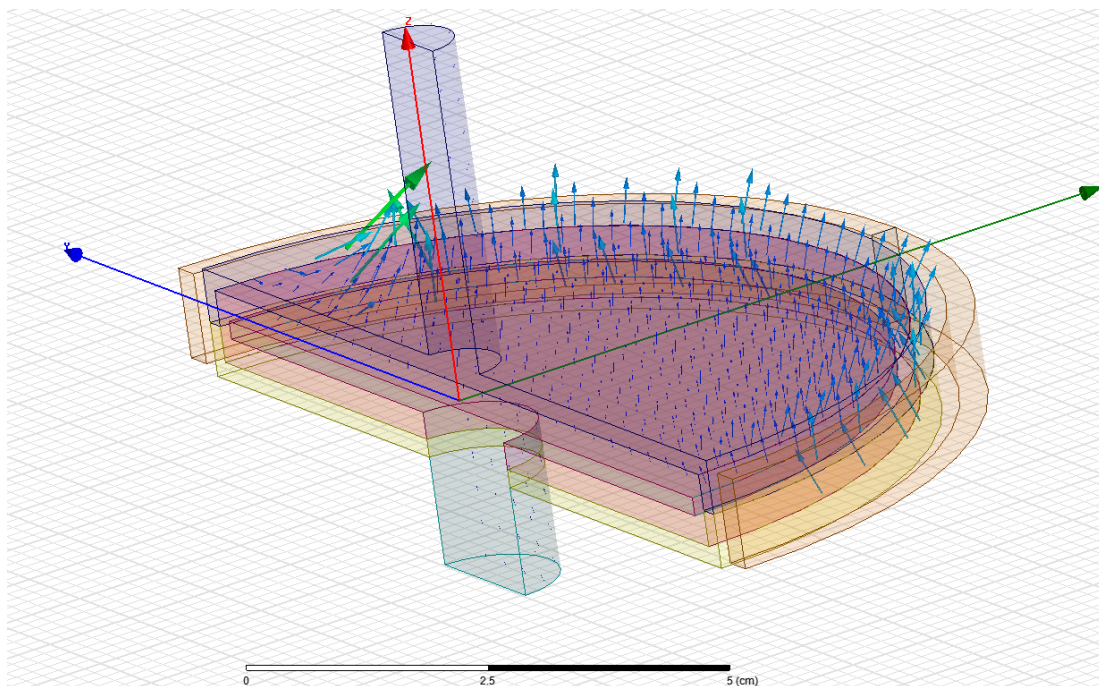


Figura 5.22 Líneas de B campo a través del mecanismo

5.3 Importación de la geometría real construida.

La geometría del mecanismo está construida, pero se desea mejorarla. Para ello se utilizarán los planos del embrague. Los importaremos al simulador y trabajaremos sobre ellos asignando a cada parte el aluminio como material.

En este apartado se mostrará la geometría del embrague cuando la importemos en el simulador. Explicando en cada imagen la ubicación de cada una de las partes del mecanismo así como su montaje completo.

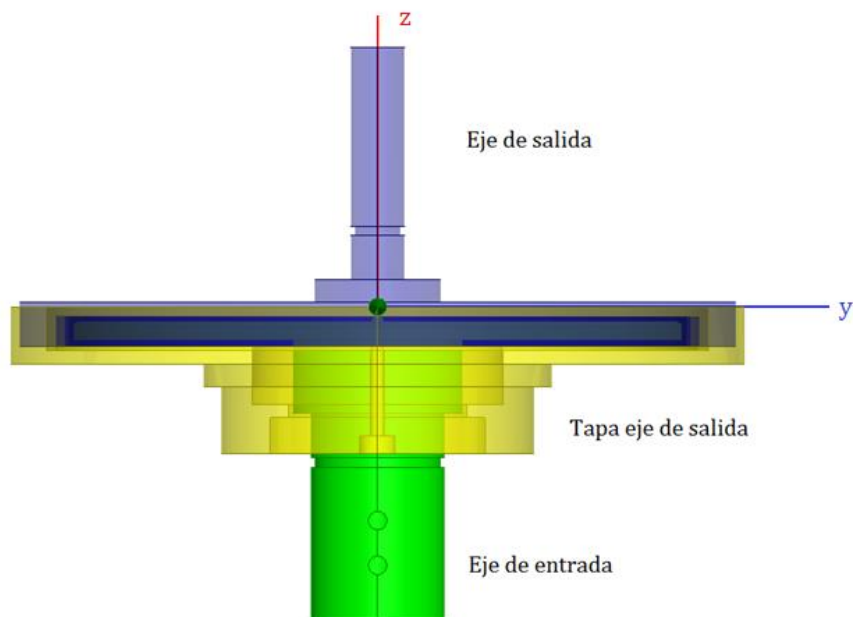


Figura 5.23 Montaje de los ejes del embrague en el simulador.

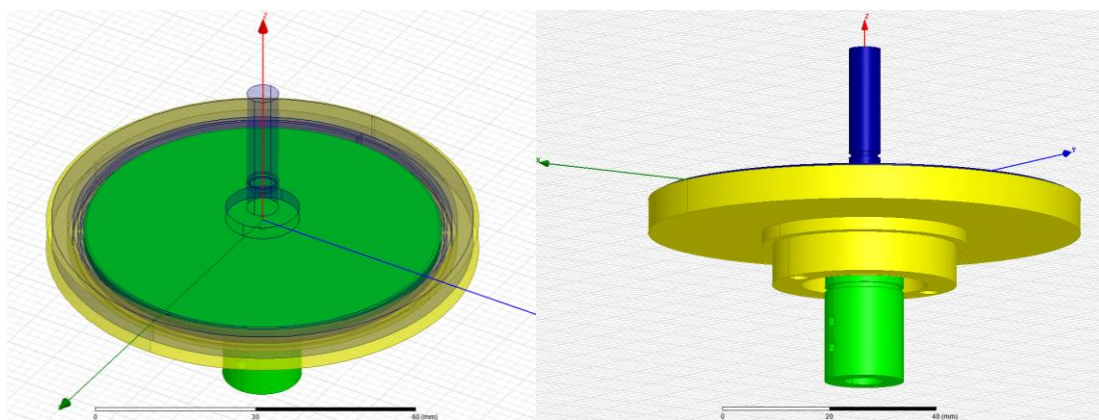


Figura 5.24 Vista espacial de los ejes del embrague en el simulador.

En las siguientes imágenes observaremos la importación de todas las partes del embrague a Ansys Maxwell.

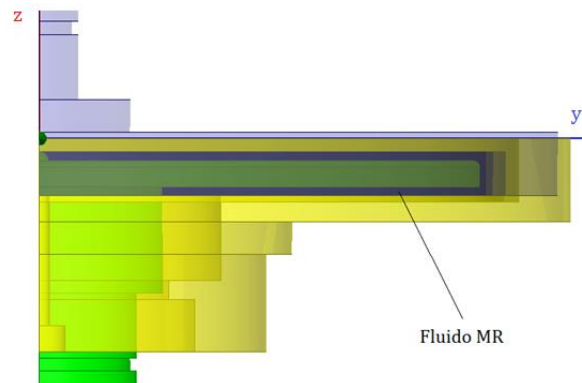


Figura 5.25 Ubicación del fluido MR entre los ejes del embrague.

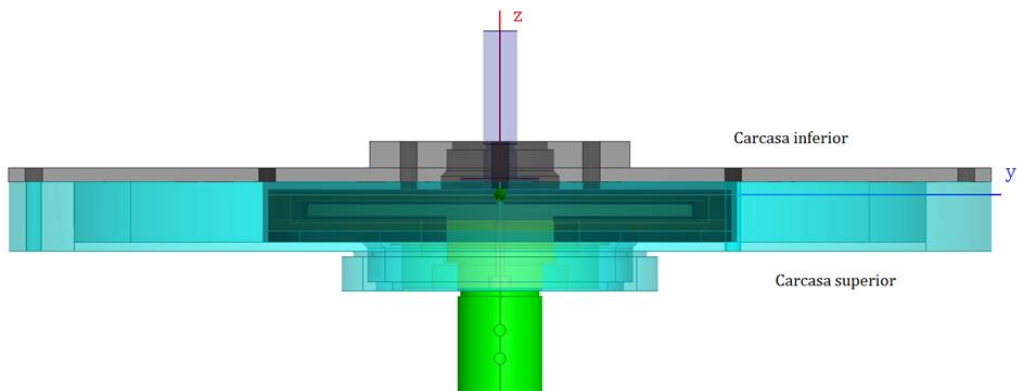


Figura 5.26 Vista exterior de las carcasas.

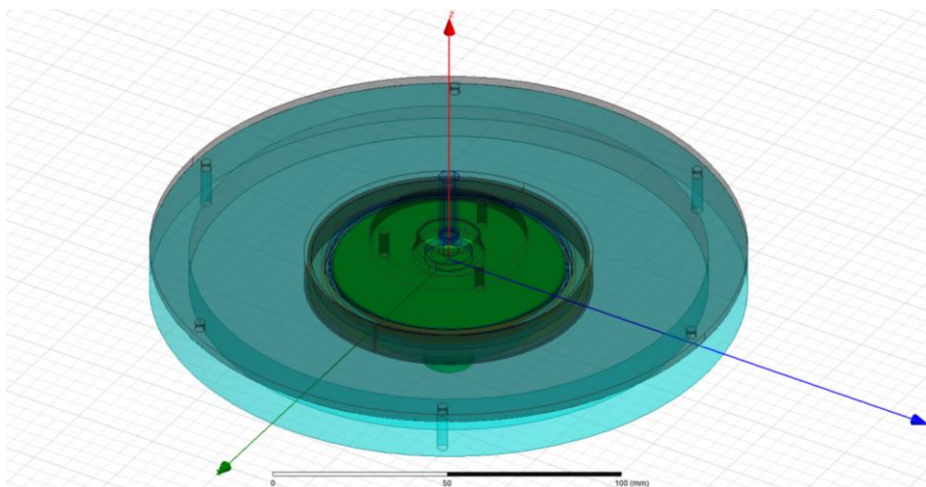


Figura 5.27 Montaje final del mecanismo.

En la figura 5.25 se puede observar como el fluido MR envuelve al disco delgado que forma parte del eje de entrada. En la figura 5.26 y figura 5.27 se encuentra todo el conjunto montado, mostrando a las carcasas con un tono de transparencia que deja ver cómo están situados los ejes en su interior.

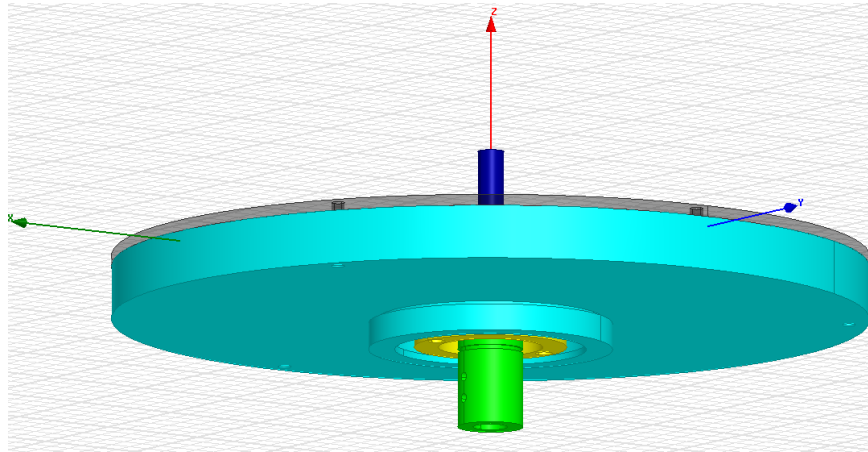


Figura 5.28 Montaje final del mecanismo.

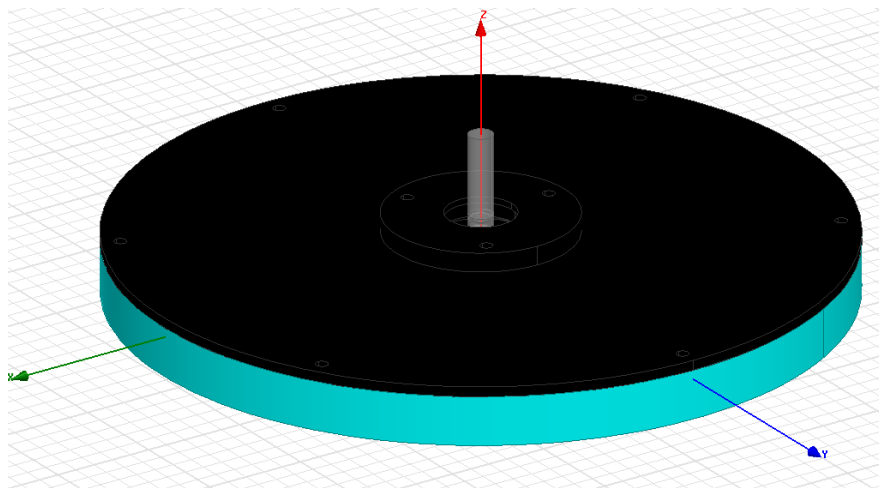


Figura 5.29 Montaje final del mecanismo.

En la figura 5.28 y figura 5.29 se muestra el conjunto final, pero las carcasas son totalmente opacas y se observa como al estar unidas cubren por completo las partes más anchas de los ejes.

CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA BOBINA. SIMULACIONES.

En éste capítulo se realizará el estudio para el diseño del bobinado, teniendo en cuenta las limitaciones geométricas que se nos pueden presentar.

El principal objetivo del trabajo es diseñar una bobina capaz de aportar el campo magnético necesario para magnetizar el fluido MR, de modo que al estar magnetizado sea capaz de transmitir el par de rotación de un eje al otro en el menor tiempo posible.

Someteremos al embrague a un campo magnético creado por una bobina alrededor del conjunto. Esta bobina se encuentra ubicada en un soporte a modo de carcasa que cubre al mecanismo, y en cuyo interior se crea un espacio para la colocación del bobinado.

6.1 Limitaciones geométricas.

Antes de empezar con el diseño, debemos tener en cuenta el espacio del que disponemos para la colocación de la bobina. En la figura 6.1 se observa el espacio donde irá colocado el enrollamiento.

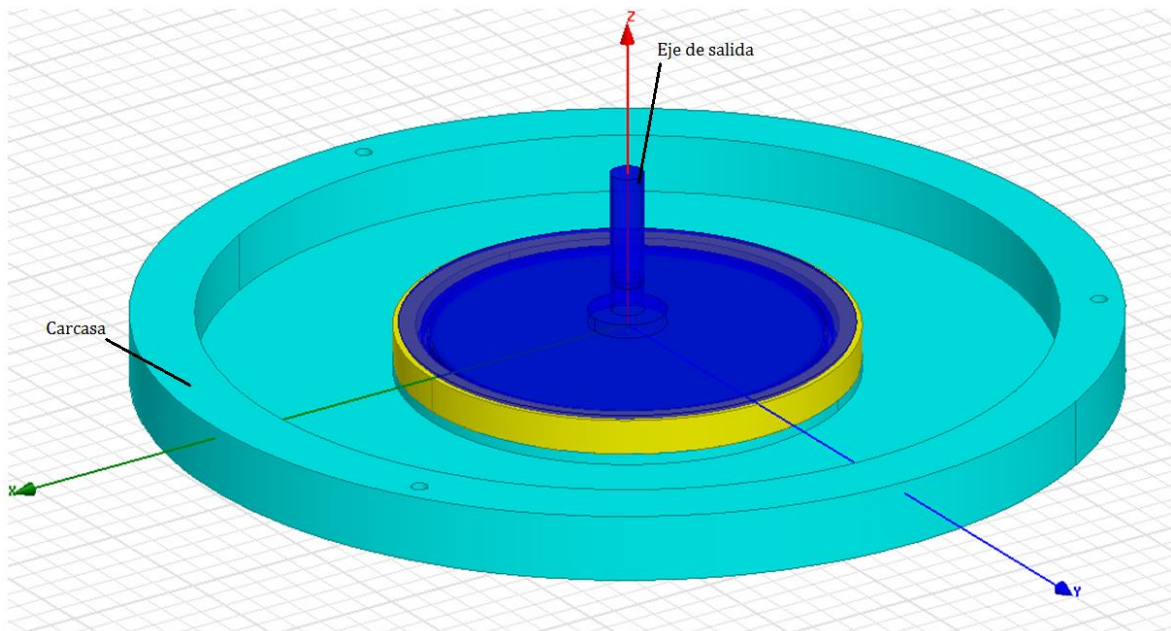


Figura 6.1 Espacio creado por las carcasas para la bobina.

En la figura 6.2 se muestra la sección de la bobina en el plano zy, el campo creado en su interior contiene al fluido MR.

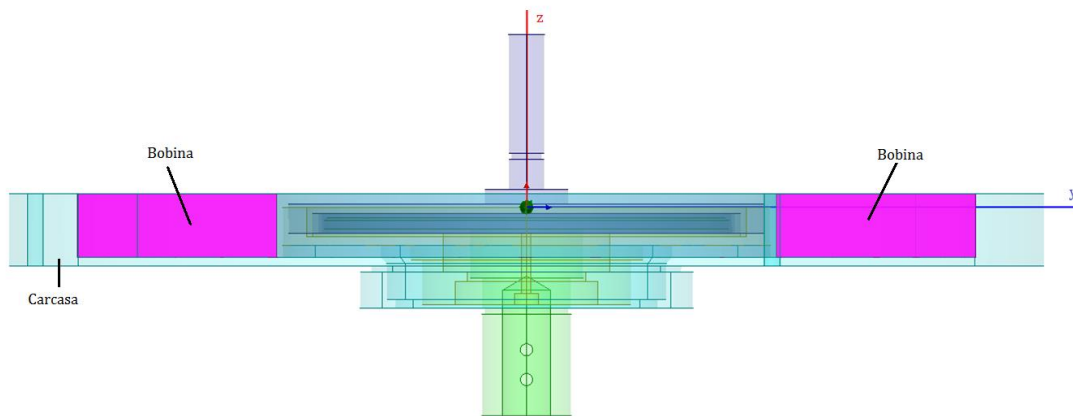


Figura 6.2 Espacio creado por las carcassas para la bobina.

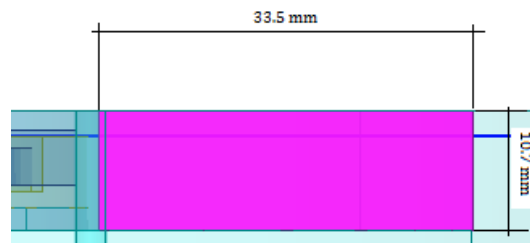


Figura 6.3 Medidas máximas de la sección de la bobina.

Posición de la bobina suponiendo que ocupe la totalidad del espacio creado por la carcasa, pero como veremos más adelante, se diseñará dejando un margen de medida por si ocurre algún error en el montaje.

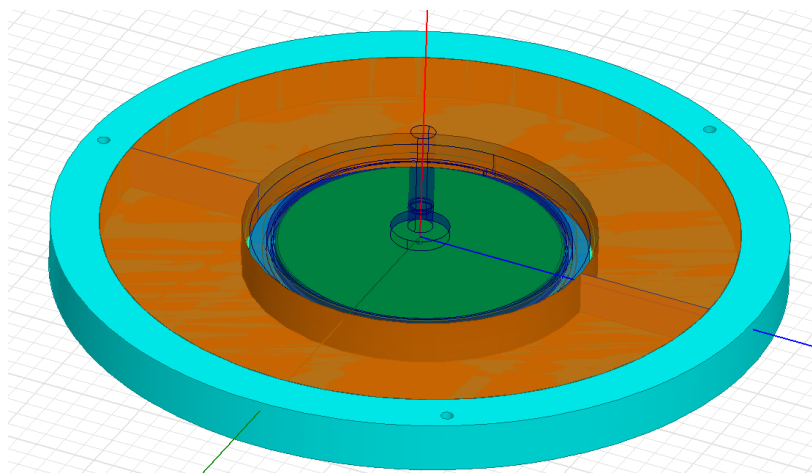


Figura 6.4 Colocación de una bobina en la carcasa.

6.2 Punto de trabajo del fluido MR.

El siguiente paso será encontrar el punto de trabajo del fluido magnetoreológico, para ello nos ayudaremos de una guía para el diseño de circuitos magnéticos y las hojas características del fluido MR que nos ofrece en fabricante, Lord Corporation [Anexo 1].

Primero seleccionamos el punto de operación (H_f , B_f). Figura 6.5. Si bien, la guía hace referencia al diseño de un electroimán, la forma de buscar el punto de trabajo del fluido, es el mismo.

Elegimos un valor para el esfuerzo cortante τ suficiente para salir de la zona donde el fluido MR tiene un comportamiento Newtoniano $\tau : [40 - 50] \text{ KPa}$. Figura 6.5.

Yield Stress vs. Magnetic Field Strength

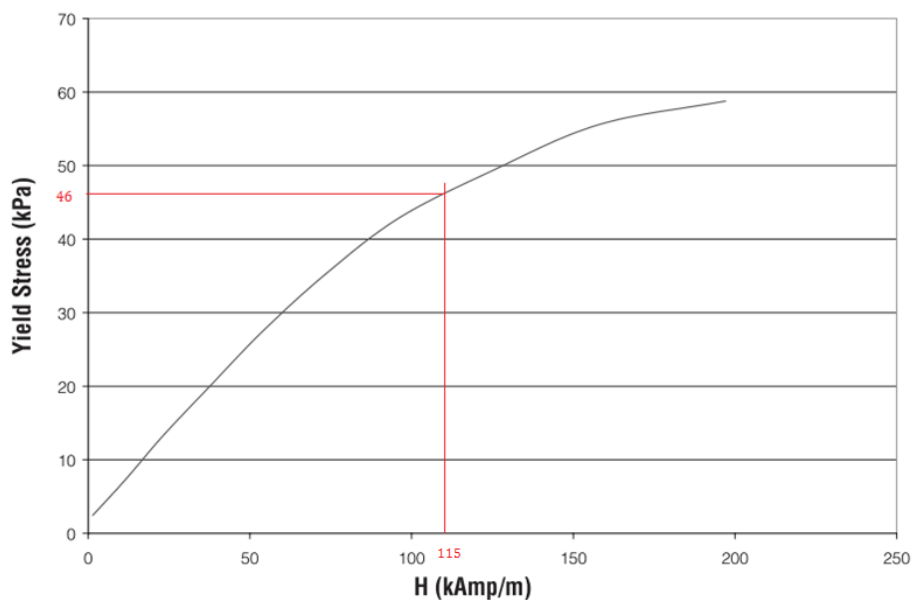


Figura 6.5 Punto de trabajo del fluido MR.

El valor con el que se trabajará en adelante $\tau = 46 \text{ KPa}$ se encuentra dentro del rango impuesto para el diseño.

A partir del valor de τ , encontramos el valor de H_f , en la gráficas características el fluido MR. $H_f \sim 115 \text{ KAm/m}$.

A partir de H_f , buscamos B_f . Figura 6.6.

Typical Magnetic Properties

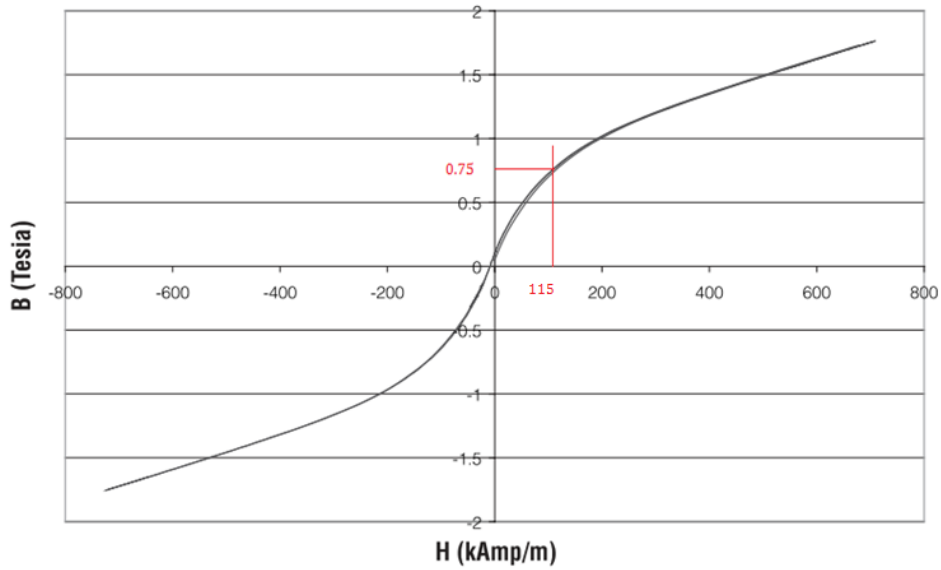


Figura 6.6 Punto de trabajo del fluido MR.

Punto de operación del fluido:

$$H_f \sim 115 \frac{\text{KAmp}}{\text{m}}$$

$$B_f \sim 0.75 \text{ Teslas}$$

Bajo estas condiciones, el fluido MR debería ser capaz de transmitir el par de torsión de un eje al otro.

6.3 Cálculos teóricos del bobinado.

Las figuras 6.7 y 6.8 muestran las medidas de la bobina, como se puede observar, no se ocupa la totalidad del espacio creado por las carcasas.

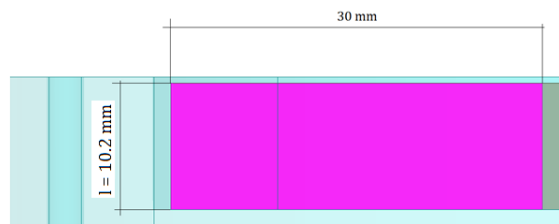


Figura 6.7 Largo de la bobina.

Radio de la bobina. Para el cálculo de las dimensiones nos hemos apoyado en los planos de las piezas del embrague. [Anexo 2]

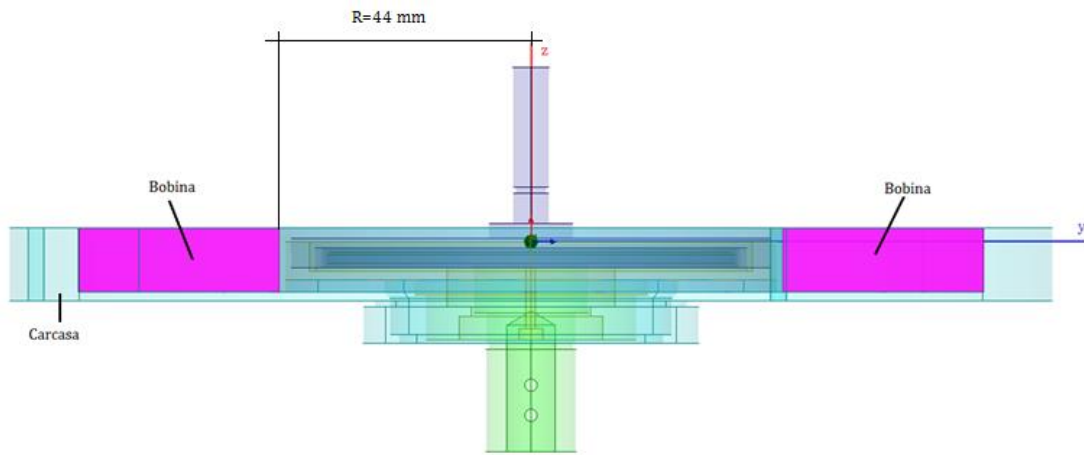


Figura 6.8 Radio de la bobina.

DATOS

$$R = 0.0440 \text{ m}$$

$$z_2 = \frac{L}{2} = 0.0051 \text{ m}$$

$$L = 0.0102 \text{ m}$$

$$z_1 = -\frac{L}{2} = -0.0051 \text{ m}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Vs/Am}$$

$$B_f \sim 0.75 \text{ Teslas}$$

NI es valor que buscamos

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{NI}{L} \left(\frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + R^2}} - \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + R^2}} \right)$$

Sustituyendo.

$$0.75 = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{NI}{0.0102} \left(\frac{0.0051}{\sqrt{0.0051^2 + 0.044^2}} + \frac{0.0051}{\sqrt{-0.0051^2 + 0.044^2}} \right)$$

$$NI = 52872.64 \text{ Amperios vueltas}$$

Para comprobar el resultado con el simulador utilizaremos **NI= 50 KA-vueltas**. El valor de la corriente que circula por el conductor de cobre que imponemos al diseño está entre [2.5 - 3] Amperios. Dependiendo de las condiciones, limitaciones y necesidades del montaje, podemos cambiar estos valores.

6.4 Bobina final.

La posición final que tendrá la bobina está condicionada por todos los factores mencionados apartados anteriores. La figura 6.9 muestra una vista espacial de su ubicación alrededor de los ejes del embrague y apoyada en las carcassas del dispositivo.

También se puede apreciar el espacio dejado entre la bobina y la carcasa para facilitar el montaje si se llegase a realizar.

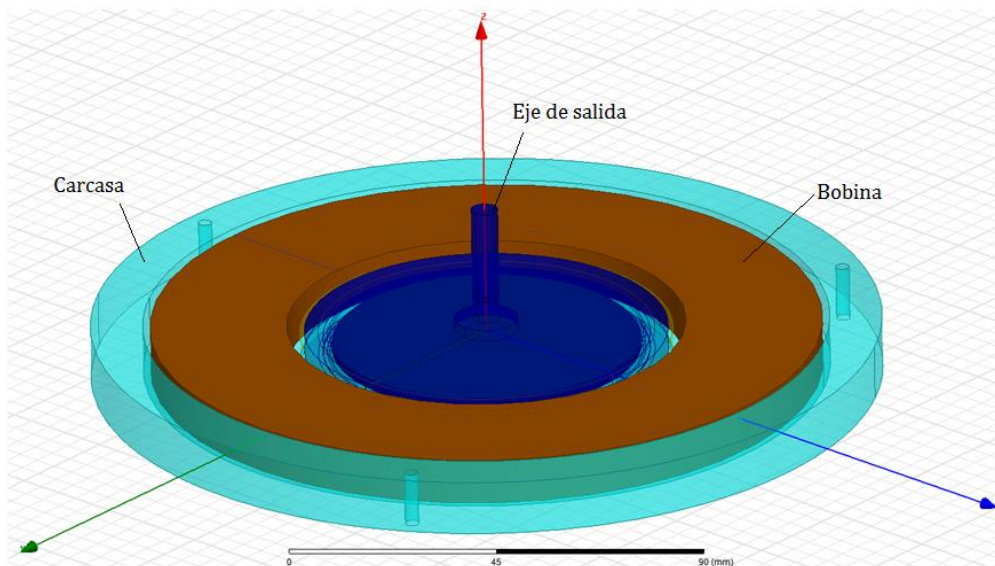


Figura 6.9 Posición final del bobinado.

Vista final del mecanismo completo con el que se realizarán las simulaciones.

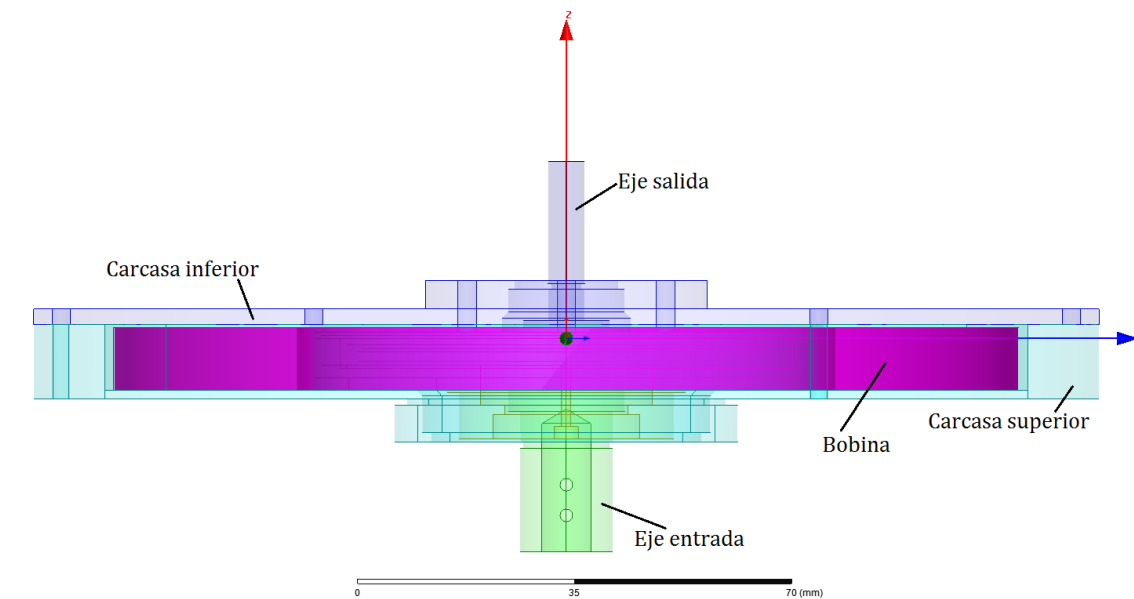


Figura 6.10 Modelo final para la simulación.

La dirección de las líneas del campo magnético depende de la dirección de la corriente en el bobinado. En este caso, las líneas de campo son paralelas al eje z. Figura 6.11.

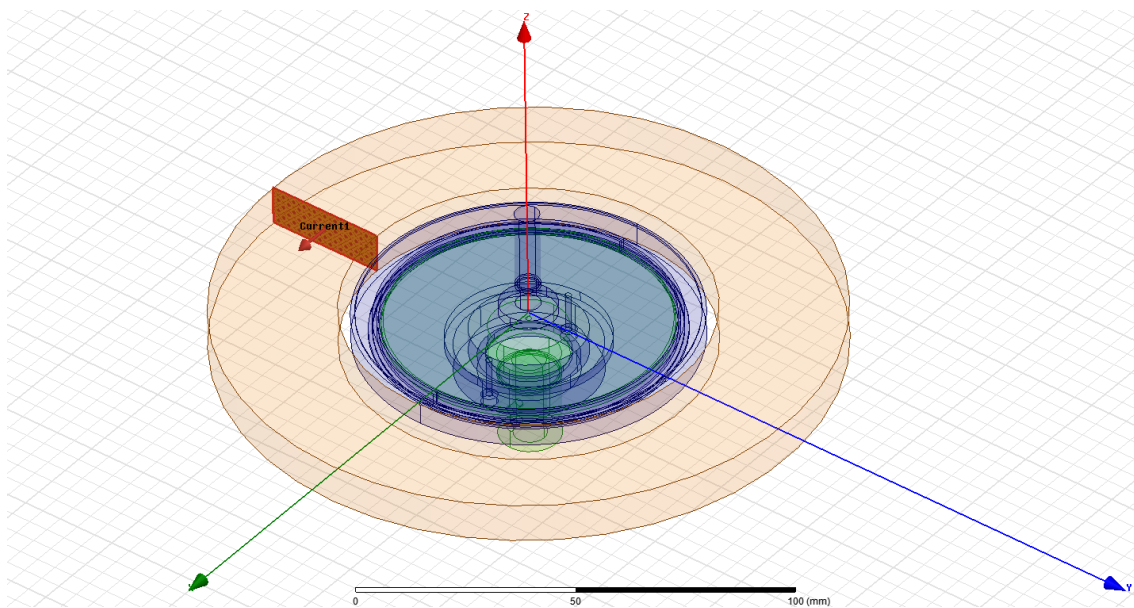


Figura 6.11 Dirección de la corriente en la bobina.

6.5 Simulaciones de todo el conjunto.

Una vez que hemos diseñado geoméricamente la bobina, importado los planos del embrague, y tener una idea los resultados de la simulación con los diferentes materiales que hemos estudiado en capítulos anteriores. Vamos a trabajar sobre el diseño final de embrague, observaremos los resultados que obtendremos y si se da el caso, intentaremos dar alguna idea de mejora del diseño.

Emplearemos en nuestras simulaciones hierro y aluminio como materiales de construcción de las partes del mecanismo. Aunque se ha descartado al hierro para la construcción, se realizaran algunas simulaciones para confirmar su comportamiento al exponerlo al campo creado por la bobina.

6.5.1 Simulaciones del embrague con sus componentes contruidos con aluminio.

En este apartado se realizaran las simulaciones y se compararán con los resultados teoricos.

La imagen de la figura 6.12 muestra el campo creado por la bobina. Los valores de la tabla adjunta comprueban los datos obtenidos en los calculos previo.

Resultados de la simulacion aplicando **NI= 50 KA-vueltas.**

$$B = [5.5 \times 10^{-1} \quad 8.5 \times 10^{-1}] \text{ Teslas.}$$

Valor de **B** según las gráficas.

$$B_f \sim 7.5 \times 10^{-1} \text{ Teslas}$$

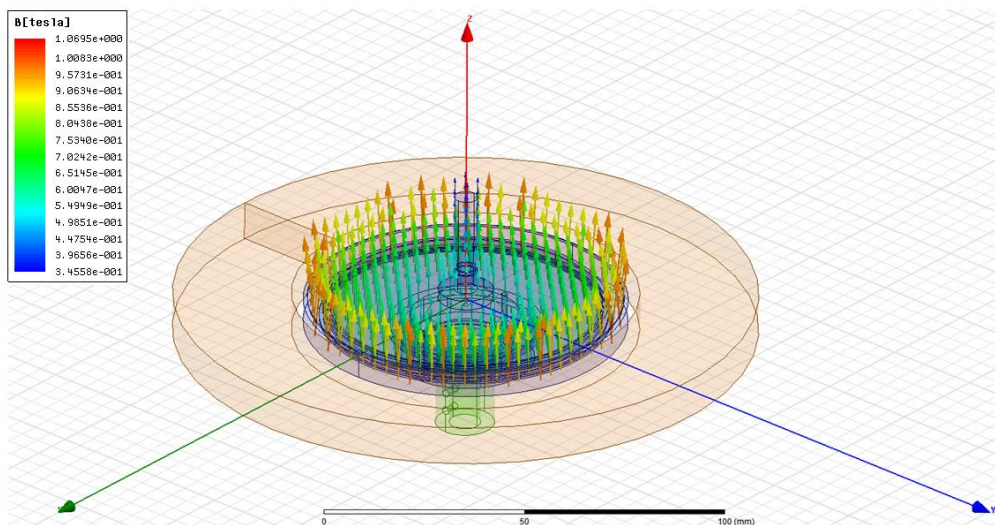


Figura 6.12 Simulación final.

Líneas de campo magnético a través de los ejes del embrague. Se ha ocultado la bobina para mejorar la visión en el interior del mecanismo. Figura 6.13.

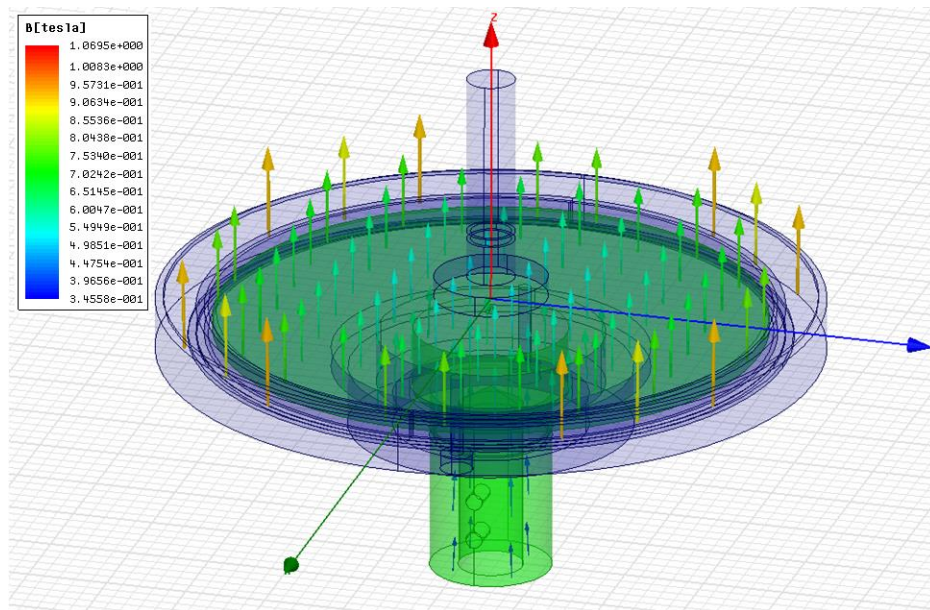


Figura 6.13 Simulación final de los ejes del embrague.

Magnitud del campo magnético en el interior del mecanismo. En estas imágenes no se observa la orientación del campo sino la intensidad en función de la distancia a la bobina. Figuras 6.14 y 6.15.

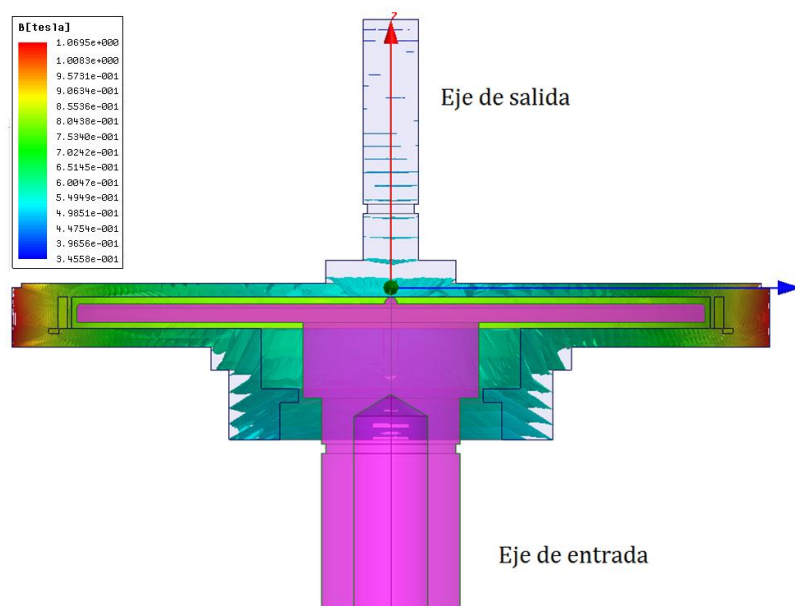


Figura 6.14 Distribución del campo magnético en el interior del embrague.

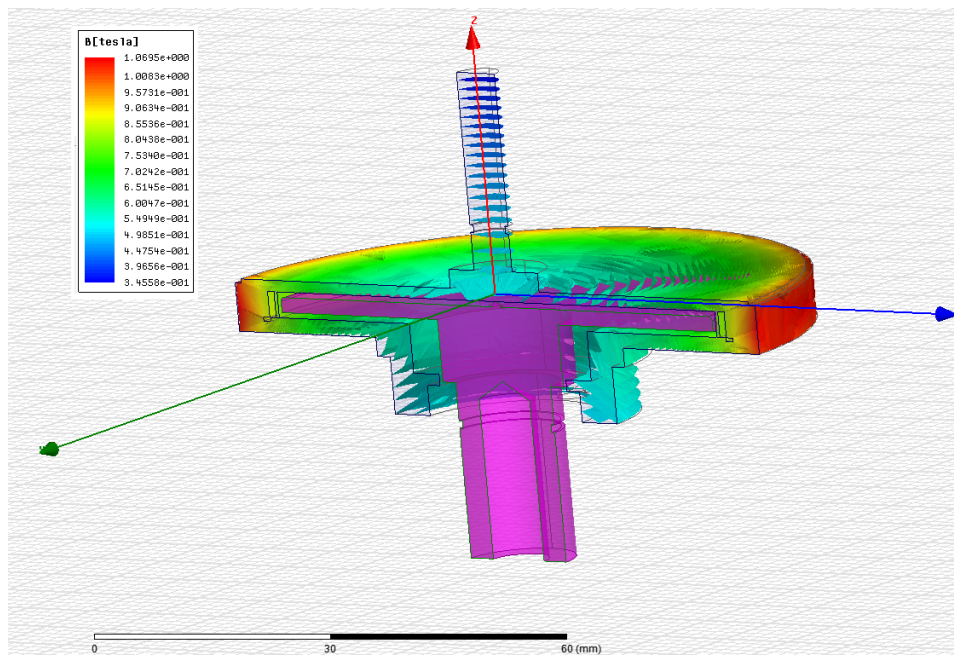


Figura 6.15 Distribución del campo magnético en el interior de los ejes del embrague.

6.5.2 Simulaciones del embrague con sus componentes contruidos con hierro.

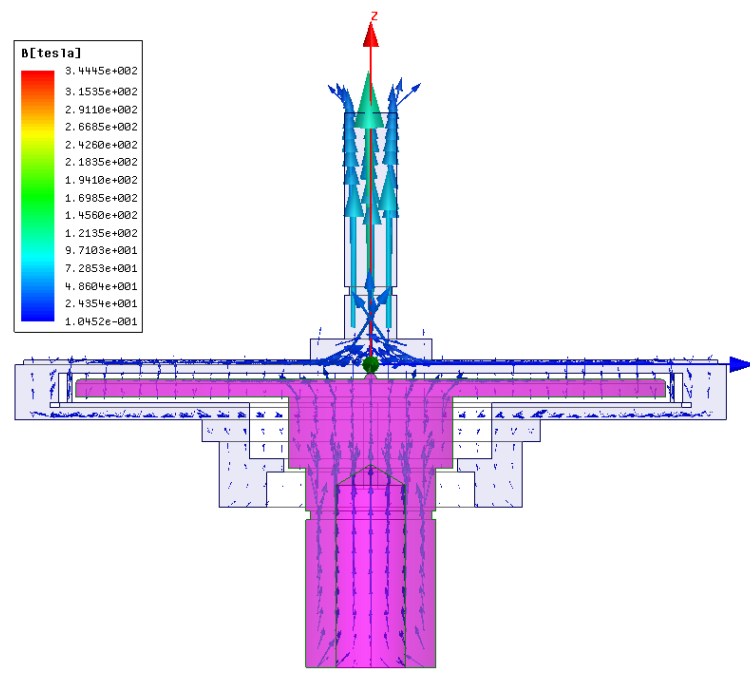


Figura 6.16 Simulación del campo magnético a través del embrague construido con hierro.

En las figuras 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 se observa el recorrido de las líneas de campo magnético del embrague construido con hierro. Se puede observar como el campo apenas magnetiza la zona del fluido.

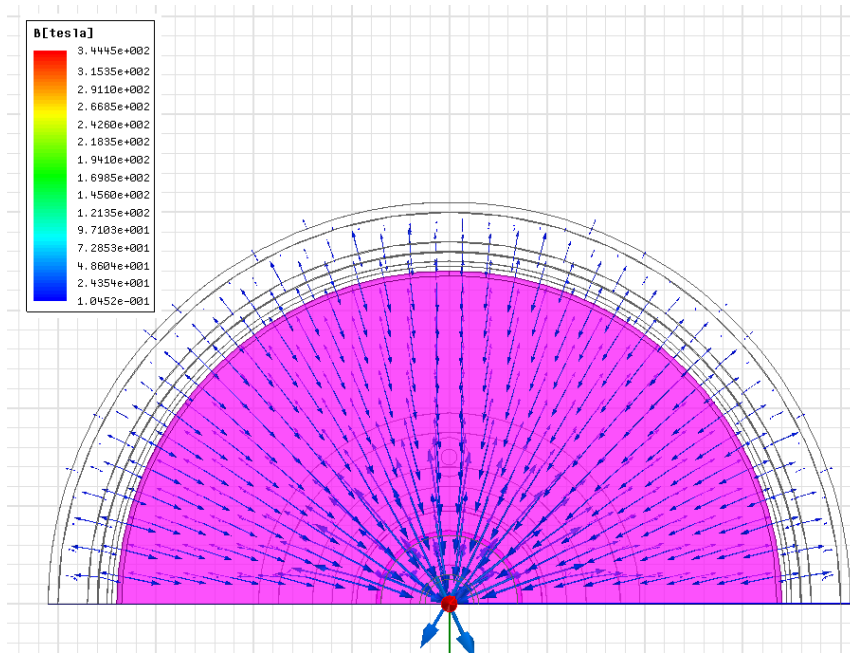


Figura 6.17 Líneas de campo en el hierro.

Los valores tan altos de **B** de la tabla adjunta en la imagen se deben a que en las secciones más pequeñas de los ejes, el campo magnético se intensifica.

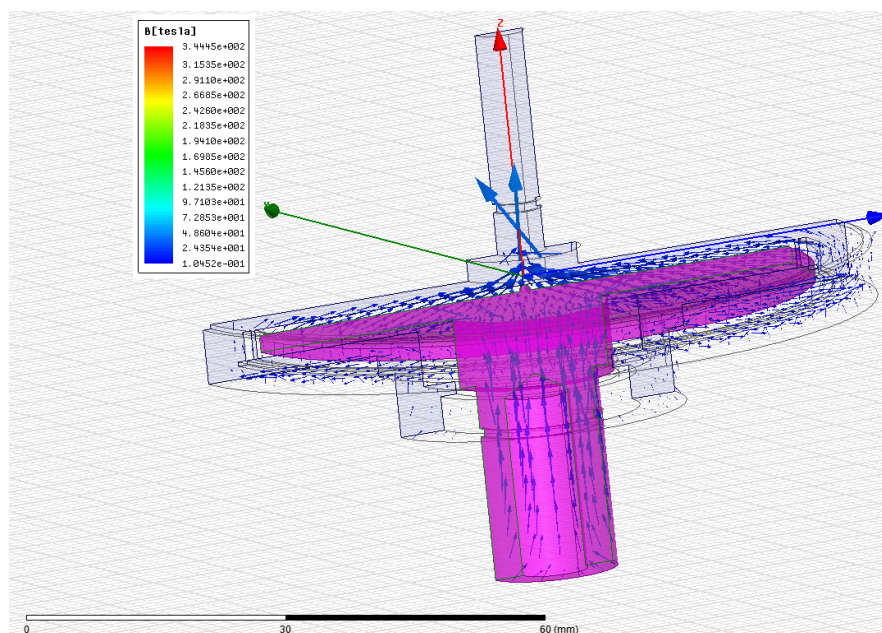


Figura 6.18 Líneas de campo en el hierro.

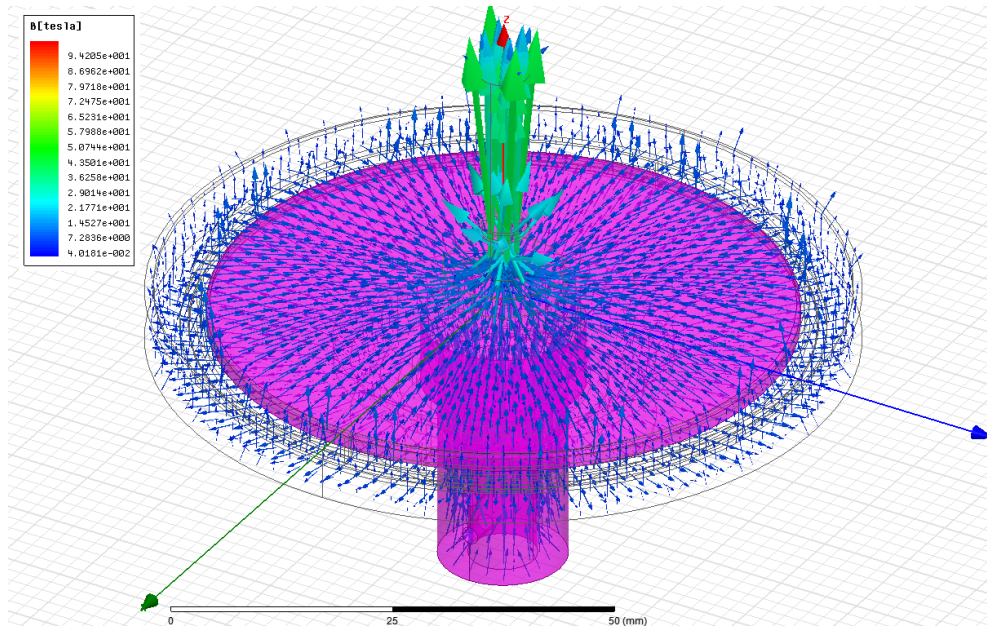


Figura 6.19 Líneas de campo en el hierro.

6.6 Resultados.

Durante la elaboración de este trabajo se ha ido realizando cálculos y simulaciones para lograr conseguir los objetivos propuestos.

Se ha empezado con modelos aproximados en 2D y 3D, estudiando el comportamiento de los materiales que nos hemos planteado para la construcción de las piezas del mecanismo y también observado la orientación del campo magnético creado a través de ellas. Como resultado de estas simulaciones se ha concluido recomendar realizar la fabricación de los componentes con aluminio debido a los inconvenientes que nos da el hierro.

Una vez que se ha importado los modelos reales del mecanismo y definido las dimensiones de la bobina, se ha procedido a su simulación utilizando aluminio. El resultado de estas simulaciones nos dan un valor de **NI= 50KA-vuelta**.

Como se ha impuesto una corriente en un rango de [2.5 a 3] amperios, en el caso que se utilice el mayor valor de la corriente (3A) para reducir el número de vueltas (N), su valor sería muy elevado.

$$N \sim 16000 \text{ vueltas}$$

CAPÍTULO 7. PROPUESTA DE DISEÑO UTILIZANDO UN ELECTROIMÁN.

Debido a la poca viabilidad que supondría la construcción de la bobina del capítulo anterior en este capítulo se estudiará el uso de un electroimán como fuente del campo magnético.

7.1 Diseño del circuito magnético.

Apoyándonos en la guía para el diseño de un circuito magnético que nos ofrece Lord Corporation [Anexo 3] calcularemos los valores necesarios para la simulación y posible construcción. El electroimán será construido a partir de un núcleo de acero sobre el cual se enrollara cables cobre para producir flujo magnético Φ a través de su estructura. Figura 7.1

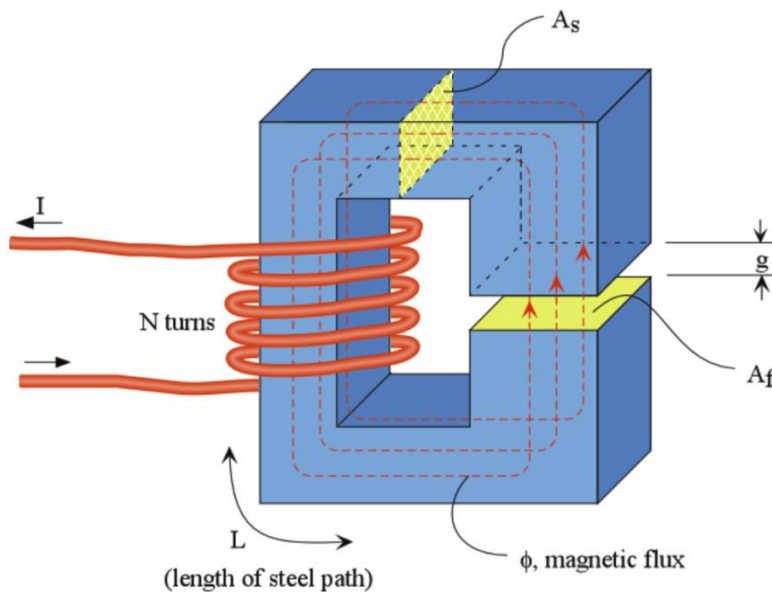


Figura 7.1 Modelo básico de un electroimán.

PASOS

- Selecciona el punto de operación del fluido MR. Obtenido en el apartado 6.2 del capítulo 6.

$$H_f \sim 115 \frac{KAmp}{m}$$

$$B_f \sim 0.75 \text{ Teslas}$$

- Continuidad del flujo magnético Φ . Núcleo acero (Steel).

$$\Phi_{acero} = \Phi_{aire} = \Phi_{aluminio} = \Phi_{fluido}$$

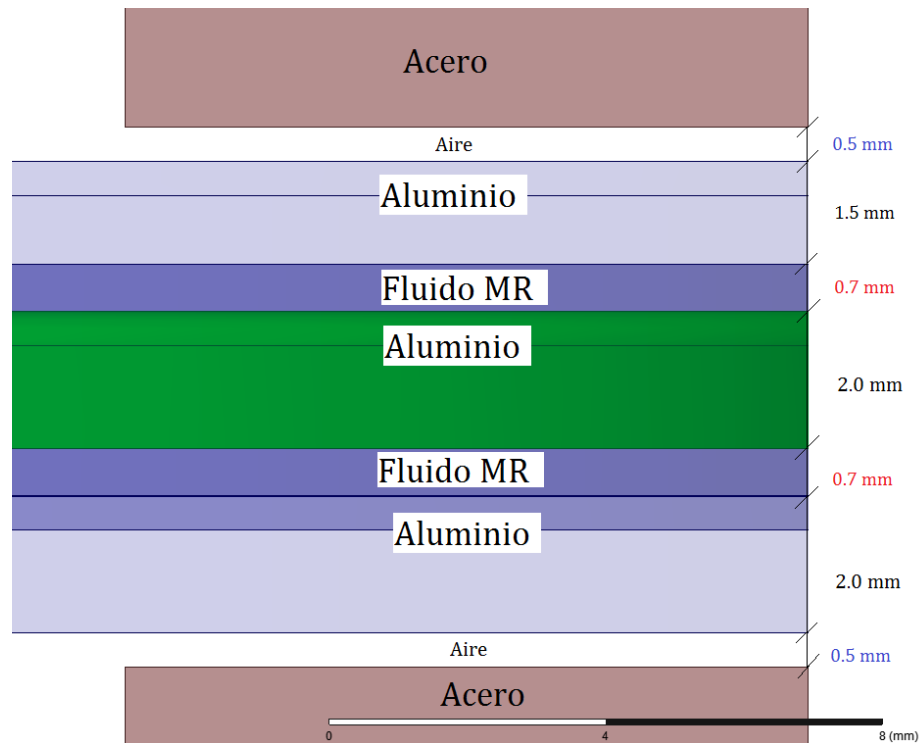


Figura 7.2 Capas que atraviesa el flujo magnético Φ .

La geometría del electroimán se ha definido dependiendo de la zona de los discos del embrague donde podíamos efectuar el montaje.

Datos.

$$L = 0.16 \text{ m}$$

$$A_{acero} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$B_f A_f = 0.75 \times 1 \times 10^{-4} + 20 \% = \Phi_f$$

Se añade este porcentaje para compensar las pérdidas de flujo en el entrehierro que suelen ser del 15% al 20%.

$$B_{acero} = \frac{\Phi_f}{A_{acero}} = \mathbf{0.9 \text{ Teslas}}$$

- Punto de operación del acero. En la curva de imantación del acero buscamos el valor H_{acero} . Figura 7.3.

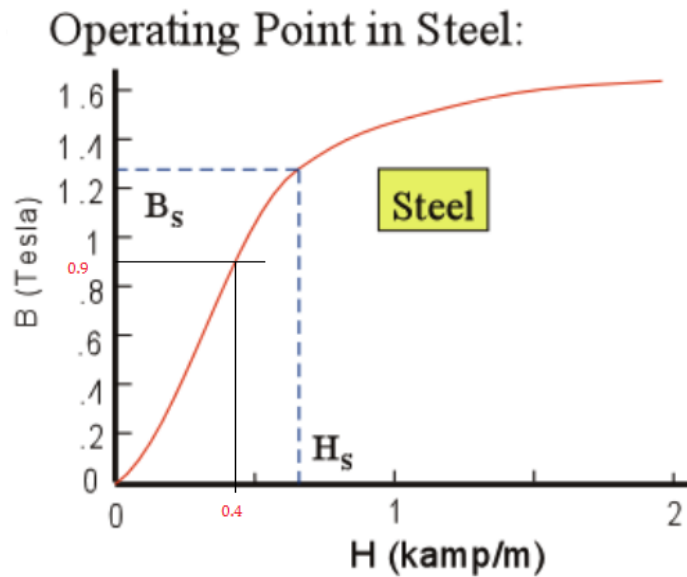


Figura 7.3 Punto de operación del acero.

De la figura 7.3 obtenemos el valor de $H_{acero} \sim 0.4 \text{ kAmp/m}$

- Solución del circuito magnético. Al ser materiales paramagnéticos, los cálculos realizados con el aire y el aluminio son despreciables.

$$L = 0.16 \text{ m}$$

$$l_1 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad \text{espesor de la primera capa de fluido}$$

$$l_2 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad \text{espesor de la segunda capa de fluido}$$

$$H_f \sim 115 \frac{\text{kAmp}}{\text{m}}$$

$$NI = H_f l_1 + H_f l_2 + H_{acero} L$$

NI~230 Amperios vueltas

Este será el valor utilizado para la simulación del electroimán. Utilizaremos dos electroimanes para poder magnetizar el fluido en dos puntos distintos de la geometría del embrague. Figura 7.4.

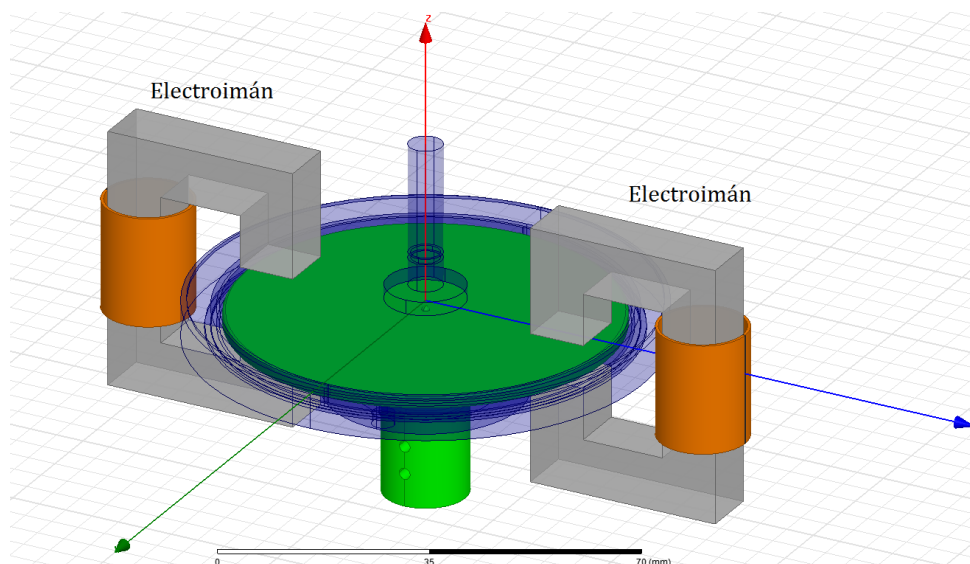


Figura 7.4 Ubicación espacial de los electroimanes.

7.2 Simulaciones del con el electroimán como fuente de campo magnético.

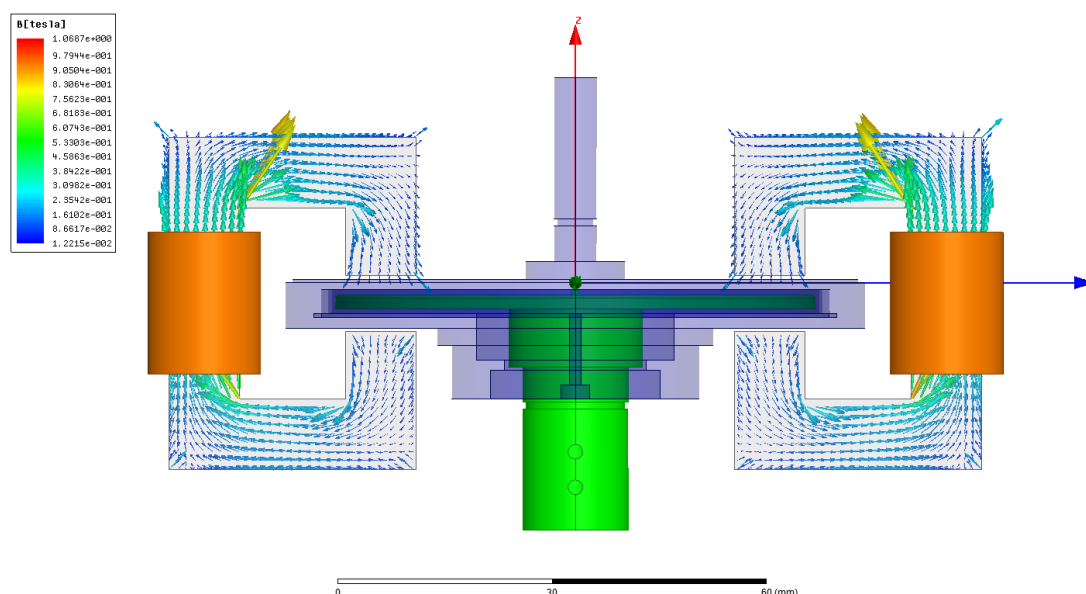


Figura 7.5 Orientación de las líneas de campo B a través del electroimán.

Resultados de la simulación aplicando **NI= 230 A-vueltas**.

$$\mathbf{B} = [3.1 \times 10^{-1} \quad 9.7 \times 10^{-1}] \text{ Teslas.}$$

Valor de **B** según las gráficas.

$$B_{\text{acero}} \sim 0.9 \times 10^{-1} \text{ Teslas}$$

El rango de resultados que nos ofrece la simulación es amplio, pero si nos centramos en el campo magnético creado en el acero y sobre todo en la proximidad de la bobina, los datos recogidos se pueden dar por válidos. La figura 7.6 muestra las zonas del embrague donde penetra en campo **B** aplicado.

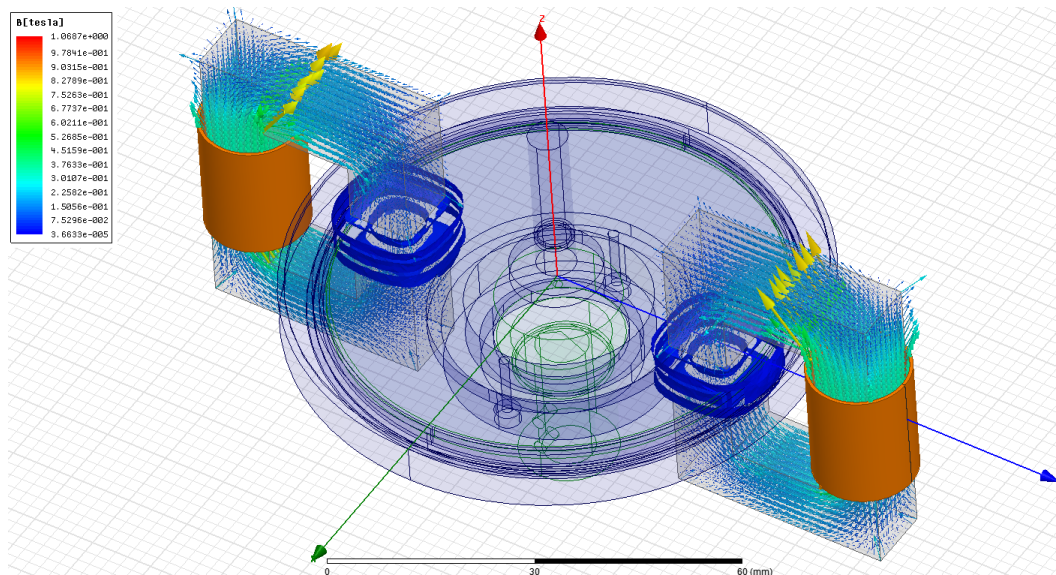


Figura 7.6 Campo magnético en los electroimanes y en el embrague.

7.3 Resultados.

Los resultados de las simulaciones del diseño realizados con electroimanes ofrecen mejores resultados en comparación con la bobina diseñada en el capítulo seis. El número de vueltas ($N=230$) de este nuevo modelo es menor. Podría estudiarse más a fondo su posible construcción para llevarlo a la práctica.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE TRABAJO.

En este capítulo se compararán los resultados de las simulaciones realizadas en los capítulos anteriores. Los modelos que entran en esta comparativa son los del diseño con la bobina colocada en las carcasas y la propuesta con el electroimán como fuente del campo magnético.

8.1 Resultados.

De la comparativa de simuladores mostrada en el capítulo tres, se ha elegido Ansys Maxwell como herramienta de trabajo, al considerarlo como el software más completo con el que se puede trabajar.

La geometría del mecanismo ya está diseñada, pero se busca mejorarla y estudiar su comportamiento en diferentes condiciones.

Del estudio realizado en el capítulo cinco se ha concluido el uso del aluminio como material de construcción de las partes del embrague. El hierro ha sido descartado por ser un material ferromagnético que posee una constante de permeabilidad magnética muy alta, la cual produce que las líneas de campo magnético recorran su estructura en lugar de atravesarla.

En la siguiente tabla se muestran los resultados numéricos de las simulaciones realizadas en el capítulo seis y capítulo siete. Dos datos de la tabla son para un electroimán.

| | Bobina | Electroimán |
|---|---|---|
| Punto de operación del fluido MR | $B_f \sim 0.7 \text{ T}$ $H_f \sim 115 \text{ Kamp/m}$ | $B_f \sim 0.7 \text{ T}$ $H_f \sim 115 \text{ Kamp/m}$ |
| Material de construcción del embrague | aluminio | aluminio |
| Numero de vueltas, N Cuando circula una corriente, I=3A. | 16000 vueltas | 80 vueltas |
| Facilidad en el montaje | Si | Se tendría que cambiar la geometría de las carcasas. |
| Viabilidad del montaje | No | Si |

Tabla 8.1 Resultados de la simulación.

8.2 Conclusiones.

En cuanto al estudio de los materiales para la fabricación de las piezas podemos concluir que el aluminio es el material con el que se debería construir. El aluminio, con permeabilidad magnética μ_r *aproximadamente* 1, permite el paso de las líneas de campo a través de su estructura, permitiendo así, que la orientación de B cruce perpendicularmente al fluido.

Uno de los principales objetivos del trabajo era diseñar una bobina capaz de crear el campo magnético necesario para trabajar con el fluido MR. Con los resultados obtenidos podemos concluir que la construcción de una bobina en el espacio creado por las carcasas no resulta del todo viable debido al número de vueltas necesarias (16000 vueltas con una corriente máxima de 3 A). Esto se debe a que la longitud de la bobina es muy pequeña en comparación con su radio. De modo que podemos decir que se ha logrado completar la simulación, pero los resultados obtenidos no son válidos para aplicarlos.

Debido a las dificultades que nos presenta el diseño de la bobina, se ha estudiado el uso de un electroimán como fuente de campo, obteniendo resultados mucho más viables para su construcción. Será necesario el uso de dos electroimanes para magnetizar como mínimo dos zonas de la superficie del fluido MR. El estudio se ha centrado en el comportamiento del electroimán y el campo magnético que este crea, dejando el nuevo diseño de la geometría del embrague para trabajos futuros.

Podemos decir que los objetivos del proyecto se han conseguido en cuando a simulación, estudio y análisis, y con el planteamiento del electroimán se está dando un posible diseño para llevarlo a la práctica.

8.3 Trabajos futuros.

En este apartado se dejará planteado un par de opciones que se ha pensado como posible solución para lograr el correcto funcionamiento del embrague.

En el primero se plantea el uso de más electroimanes para magnetizar mayor superficie del fluido. Figura 8.1.

La segunda opción corresponde al uso de pequeñas bobina colocadas en la superficie de los ejes del embrague en contacto con el fluido. De igual manera se debería cambiar la geometría de las carcasas y estudiar la viabilidad de su construcción a partir de los resultados obtenido. Figura 8.2.

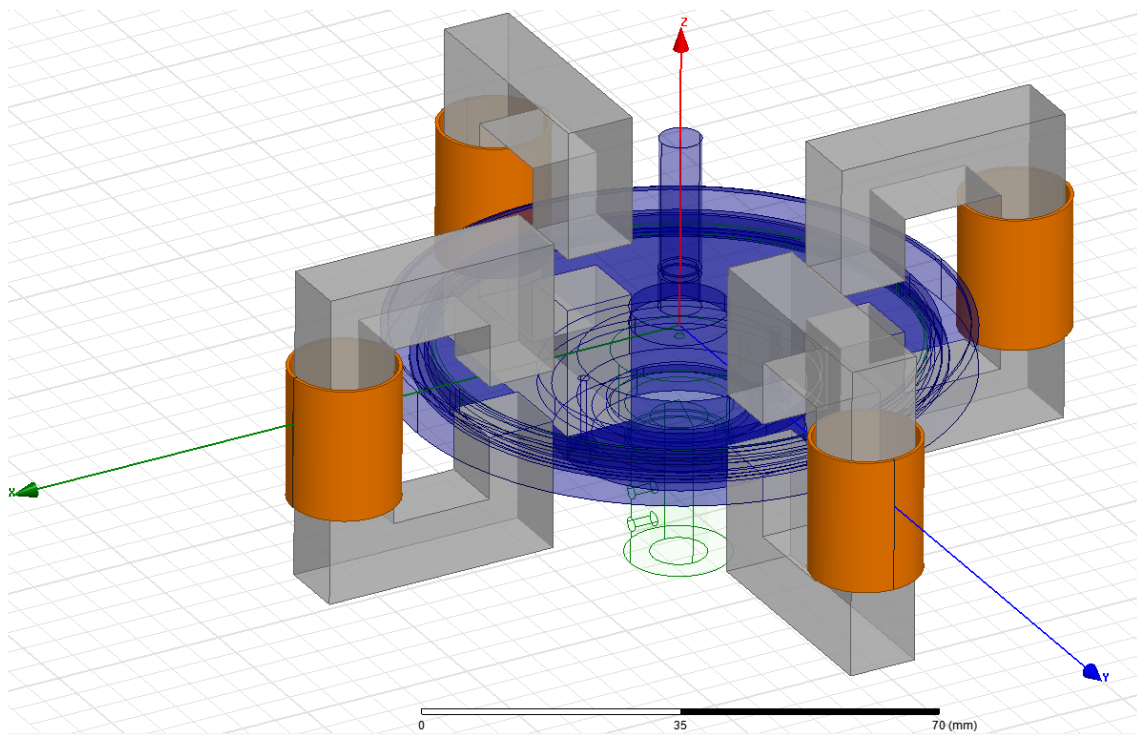


Figura 8.1 Embrague con cuatro electroimanes.

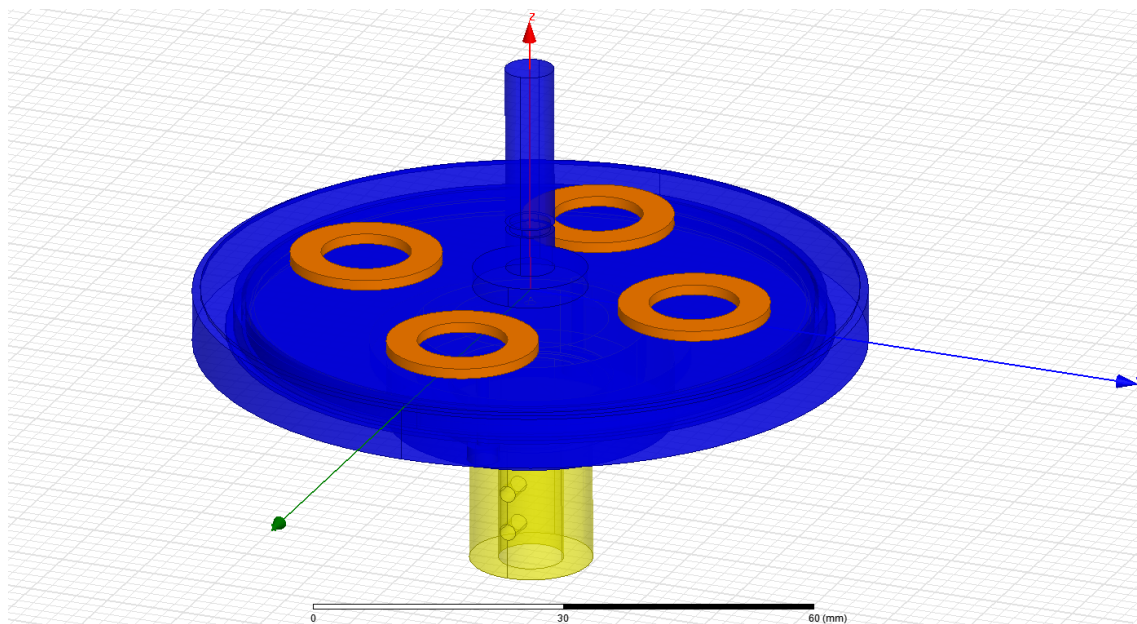


Figura 8.2 Embrague con cuatro bobinas.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] <http://marcanord.files.wordpress.com/2012/11/reologc3ada-1.pdf>
- [2] G.YANG. "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control". PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001. Pág 26.
- [3] G.YANG. "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control". PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001. Pág 26.
- [4] G.YANG. "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control". PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001. Pág 29.
- [5] G.YANG. "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control". PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001. Pág 31, 32.
- [6] http://ingenierias.uanl.mx/2/pdf/2_Miguel_Cupich_et_al_Amortiguadores.pdf
- [7] http://ingenierias.uanl.mx/2/pdf/2_Miguel_Cupich_et_al_Amortiguadores.pdf
- [8] G.YANG. "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control". PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001. Pág 33. Tabla 2.2
- [9] P.TIPLER. "Física para la ciencia y la tecnología: Volumen 2A, Electricidad y magnetismo". Editorial Reverte, 2005. Pág. 770.
- [10] P.TIPLER. "Física para la ciencia y la tecnología: Volumen 2A, Electricidad y magnetismo". Editorial Reverte, 2005. Pág. 793,799.
- [11] F.MORA. "Electromagnetismo y Circuitos eléctricos: Cuarta Edicion". Mc Graw Hill 2005. Pág 13.
- [12] [11] F.MORA. "Electromagnetismo y Circuitos eléctricos: Cuarta Edicion". Mc Graw Hill 2005. Pág 15.
- [13] <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2021.pdf>
- [14] <http://perso.wanadoo.es/santiagoportilla/Electroimanes.pdf>
- [15] G.YANG. "Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control". PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001. Pág 68.
- [16] <http://www.softpedia.es/programa-MagCAD-71390.html>
- [17] <http://www.infolytica.com/en%5Cproducts/magnet/>
- [18] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Systems+&+Multiphysics/Multiphysics+Enabled+Products/ANSYS+Maxwell>

ANEXOS

Anexo 1. Hojas características del fluido MR (Lord Technical Data).

Anexo 2. Planos del embrague.

Índice de planos.

2.1_Carcasa inferior.

2.2_Carcasa superior.

2.3_Eje de entrada.

2.4_Eje de salida.

2.5_Tapa eje de salida.

Anexo 3. Guía de diseño (Magnetic Circuit Design).

MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid

Description

LORD MRF-140CG fluid is a hydrocarbon-based magneto-rheological (MR) fluid formulated for general use in controllable, energy-dissipating applications such as shocks, dampers and brakes.

MRF-140CG fluid is a suspension of micron-sized, magnetizable particles in a carrier fluid. When exposed to a magnetic field, the rheology of MRF-140CG fluid reversibly and instantaneously changes from a free-flowing liquid to a semi-solid with controllable yield strength. Altering the strength of the applied magnetic field precisely and proportionally controls the consistency or yield strength of the fluid.

MRF-140CG fluid can be used in *valve mode* (fluid flowing through an orifice) or in *shear mode* (fluid shearing between two surfaces). In the absence of a magnetic field, MRF-140CG fluid flows freely or allows free movement. Upon application of a magnetic field, the fluid's particles align with the direction of the field in chain-like fashion, thereby restricting the fluid's movement within the gap in proportion to the strength of the magnetic field.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds instantly and reversibly to changes in a magnetic field.

Dynamic Yield Strength – provides high yield strength in the presence of a magnetic field and very low yield strength in the absence of a magnetic field; allows for a wide range of controllability.

Temperature Resistant – performs consistently throughout a broad temperature range, meeting the requirements of demanding applications such as automotive shock absorbers.

Hard Settling Resistant – provides high resistance to hard settling; easily redispersed.

Non-Abrasive – formulated to not abrade the devices in which the MR fluid is used.

Application

For more information on MR technology, refer to the MR Design Guides located on www.lord.com/mr.

Mixing – Under common flow conditions, no separation is observed between particles and the carrier fluid. However, a degree of separation may eventually occur under static conditions. If needed, use a paint shaker to redisperse the particles into a homogeneous state prior to use.

Storage

Keep container tightly closed when not in use.

Typical Properties*

| | |
|--|---------------------------|
| Appearance | Dark Gray Liquid |
| Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 800-1200 sec ⁻¹ | 0.280 ± 0.070 |
| Density | |
| g/cm ³ | 3.54-3.74 |
| (lb/gal) | (29.5-31.2) |
| Solids Content by Weight, % | 85.44 |
| Flash Point, °C (°F) | >150 (>302) |
| Operating Temperature, °C (°F) | -40 to +130 (-40 to +266) |

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

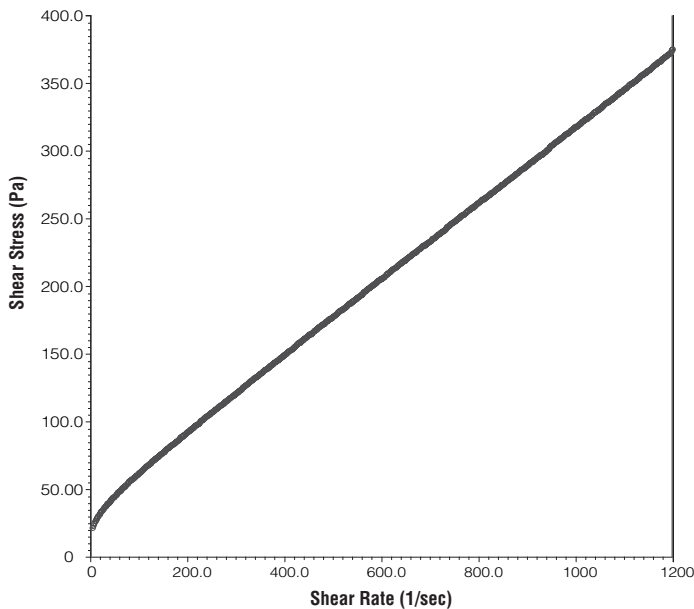
LORD TECHNICAL DATA

Cautionary Information

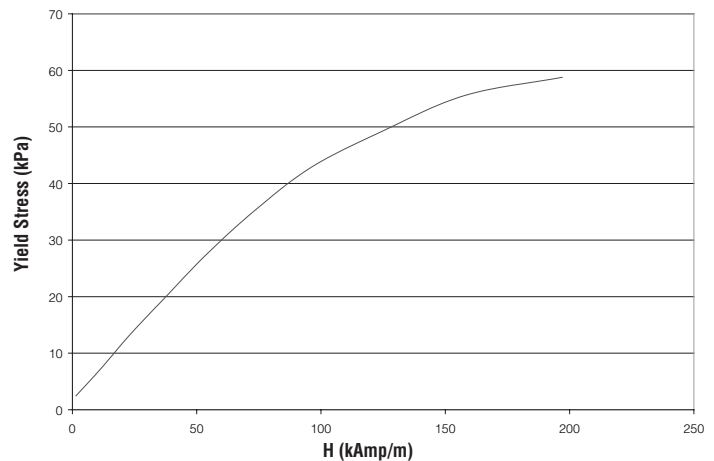
Before using this or any LORD product, refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) and label for safe use and handling instructions.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. Not for consumer use.

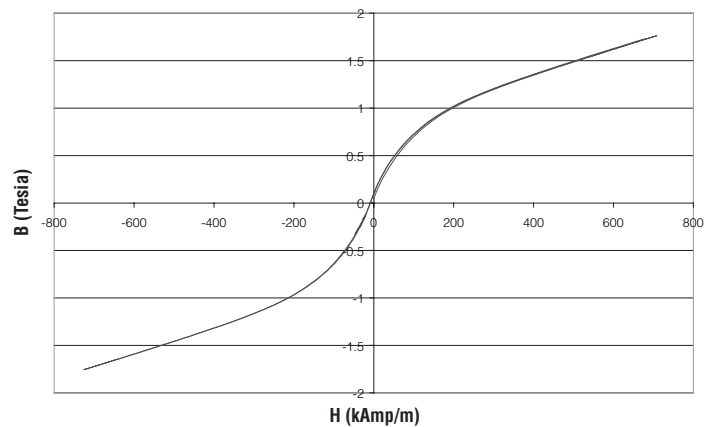
Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



Yield Stress vs. Magnetic Field Strength



Typical Magnetic Properties



Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

"Ask Us How" is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

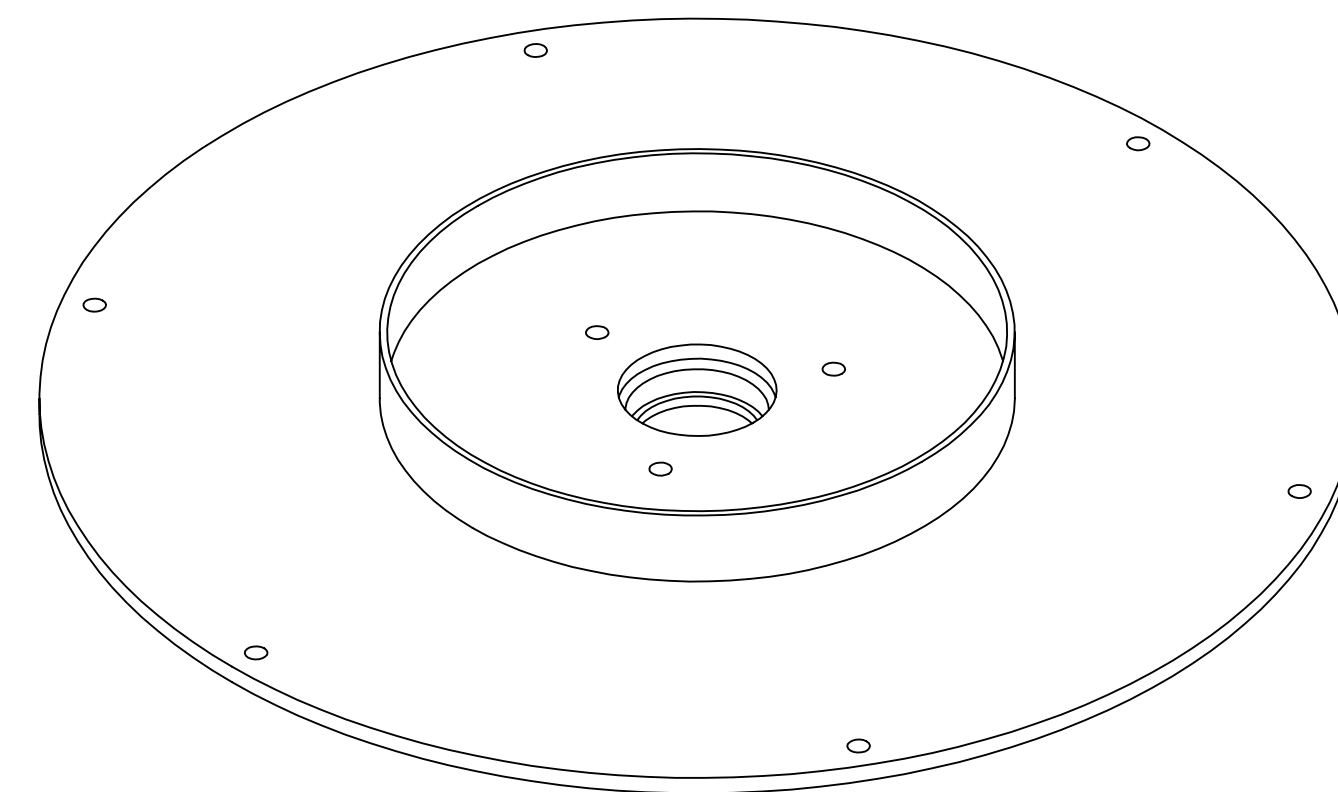
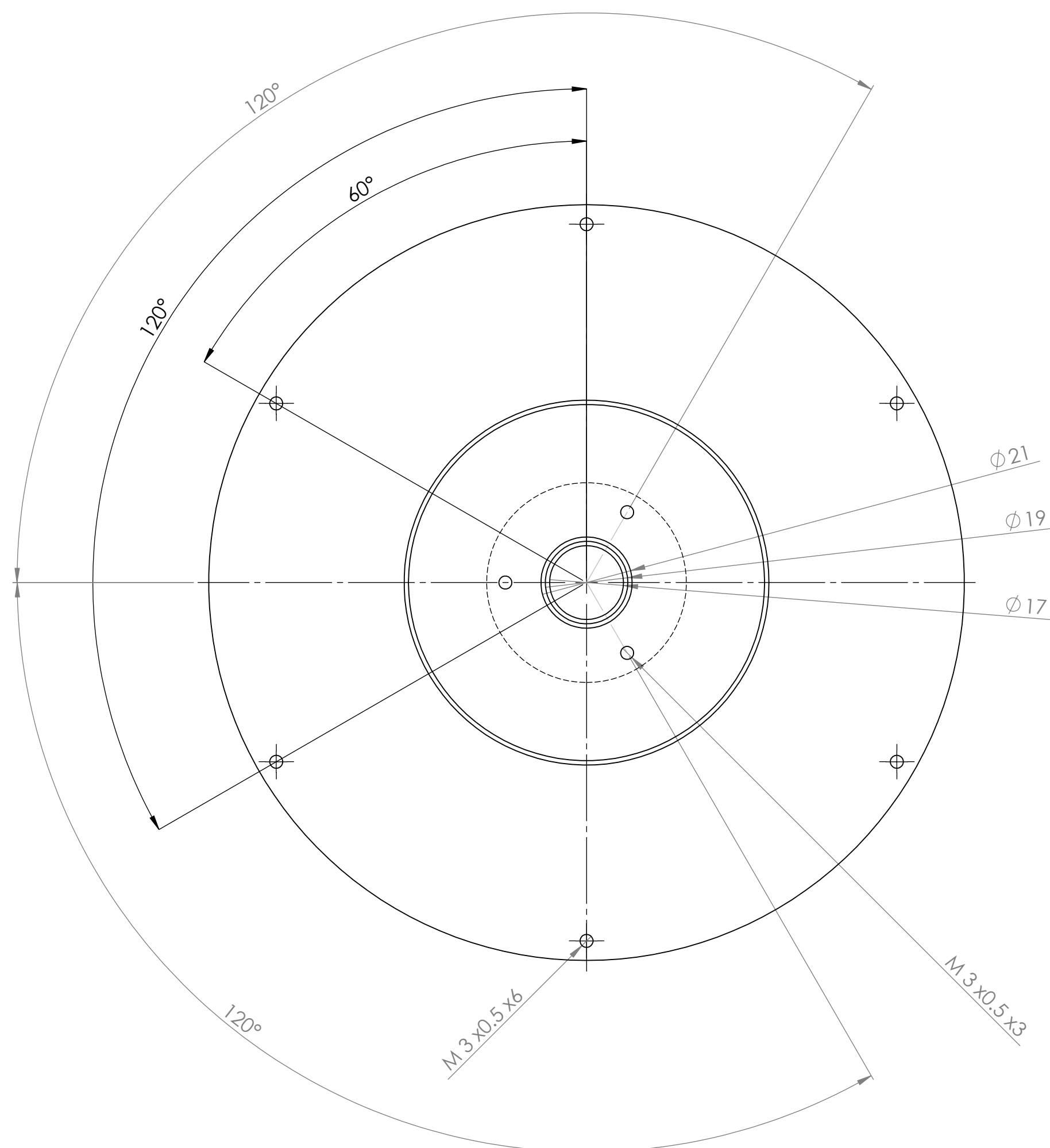
LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide . . . Ask Us How.

LORD Corporation World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)
+1 877 ASK LORD (275 5673)

www.lord.com

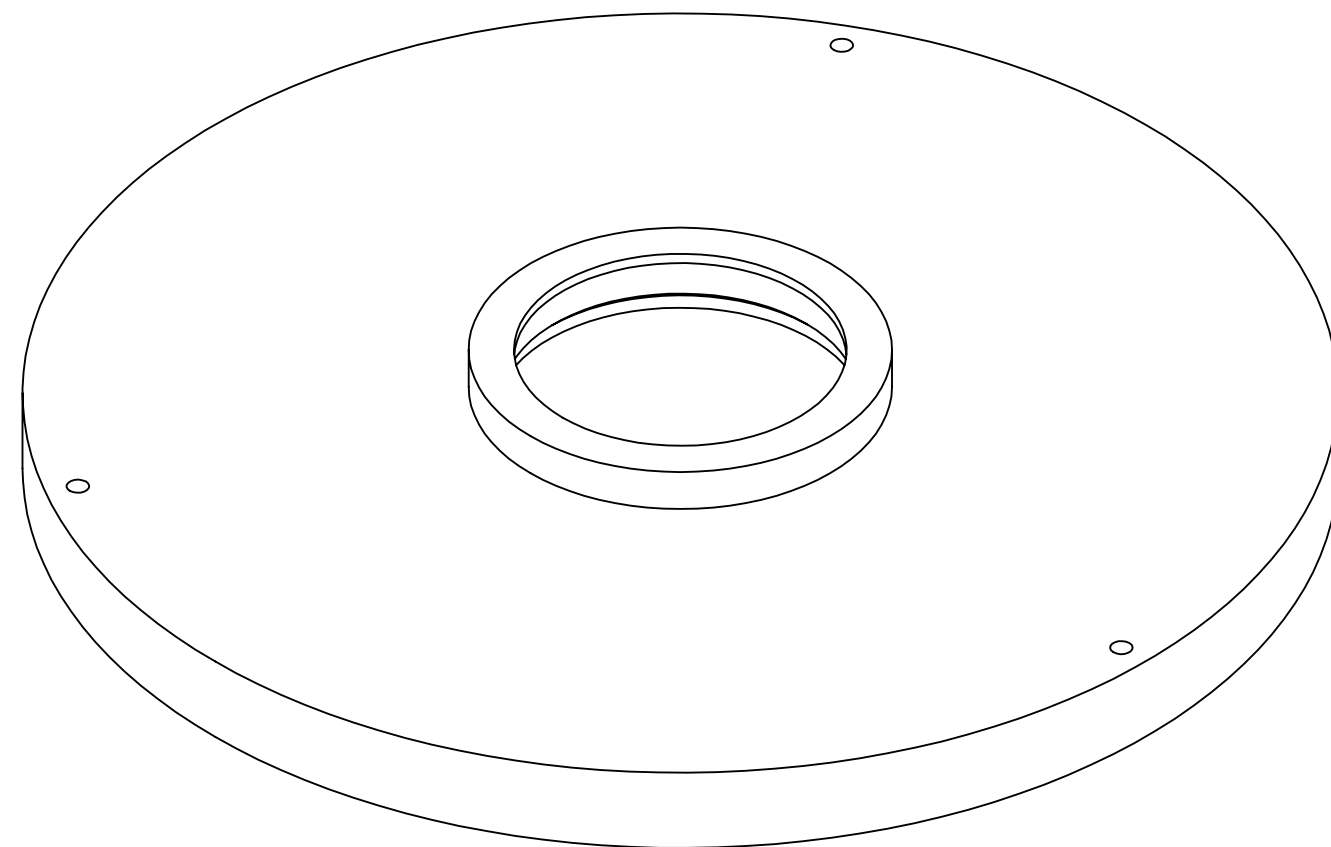
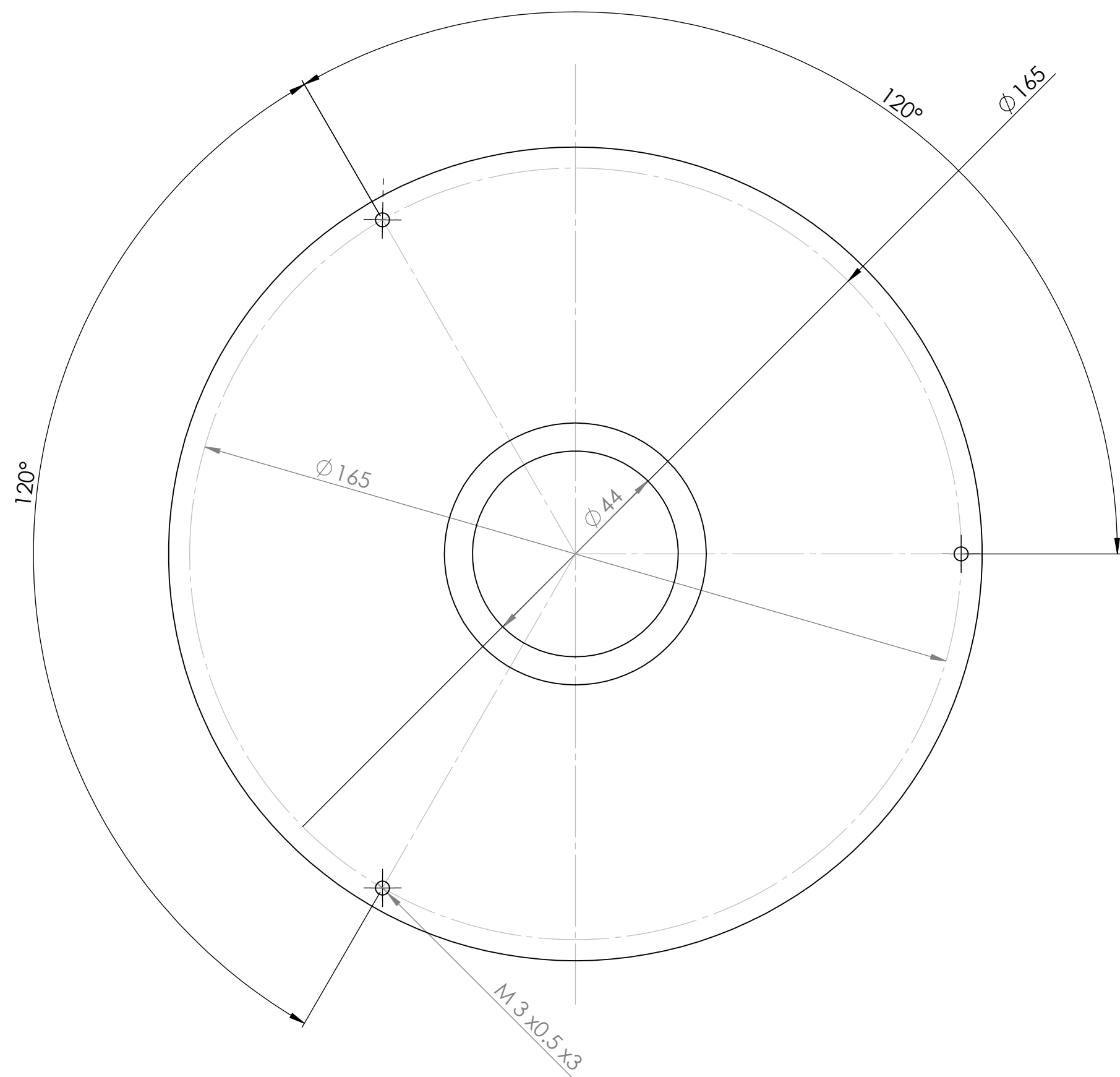
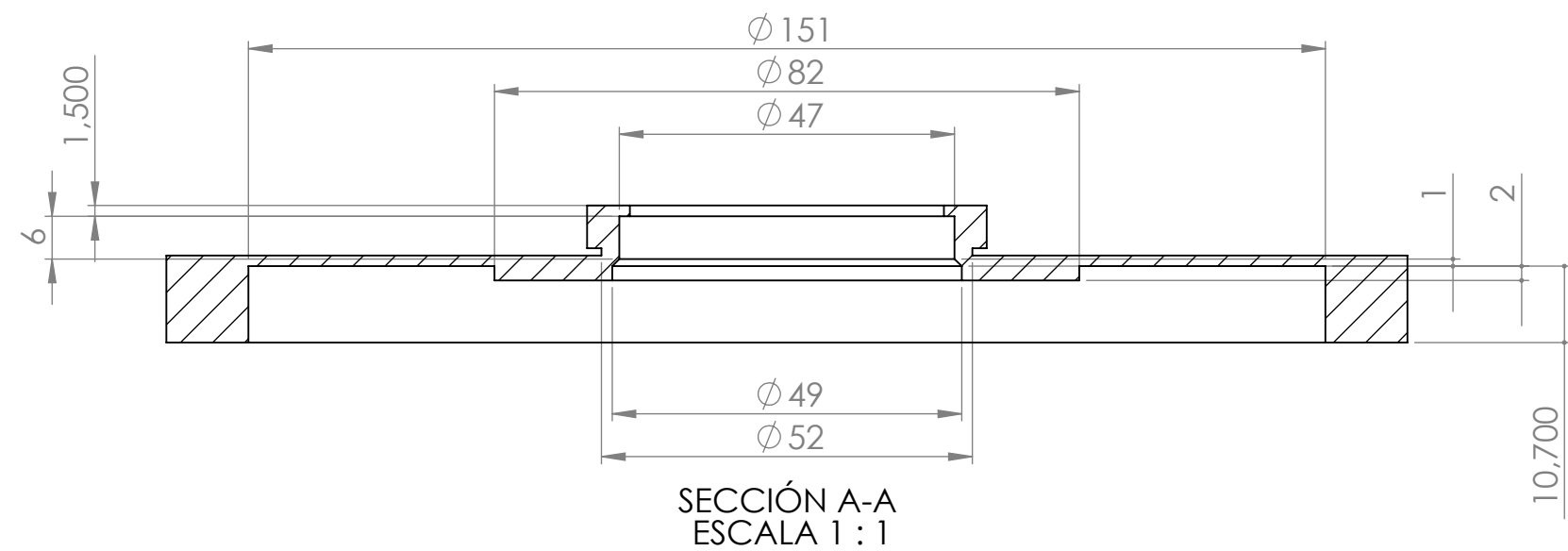
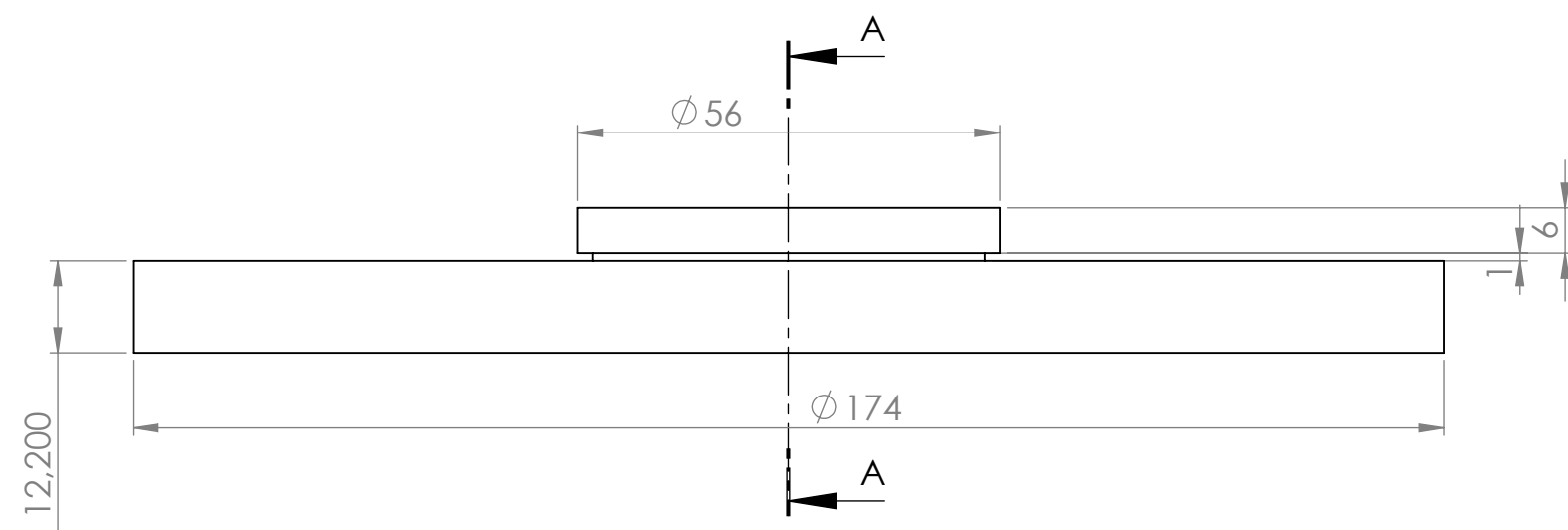


| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--------|--|----------|--|---------------------------------------|--|--------------------------|--|-------------|--|
| SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR: | | | | ACABADO: | | REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS | | NO CAMBIE LA ESCALA | | REVISIÓN | |
| DIBUJ. | | NOMBRE | | FIRMA | | FECHA | | TÍTULO: | | | |
| VERIF. | | | | | | | | | | | |
| APROB. | | | | | | | | | | | |
| FABR. | | | | | | | | | | | |
| CALID. | | | | | | | | N.º DE DIBUJO | | AP.º | |
| | | | | | | | | carcasa inferior_plano 2 | | | |
| | | | | | | | | PESO: | | ESCALA:1:2 | |
| | | | | | | | | | | HOJA 1 DE 1 | |

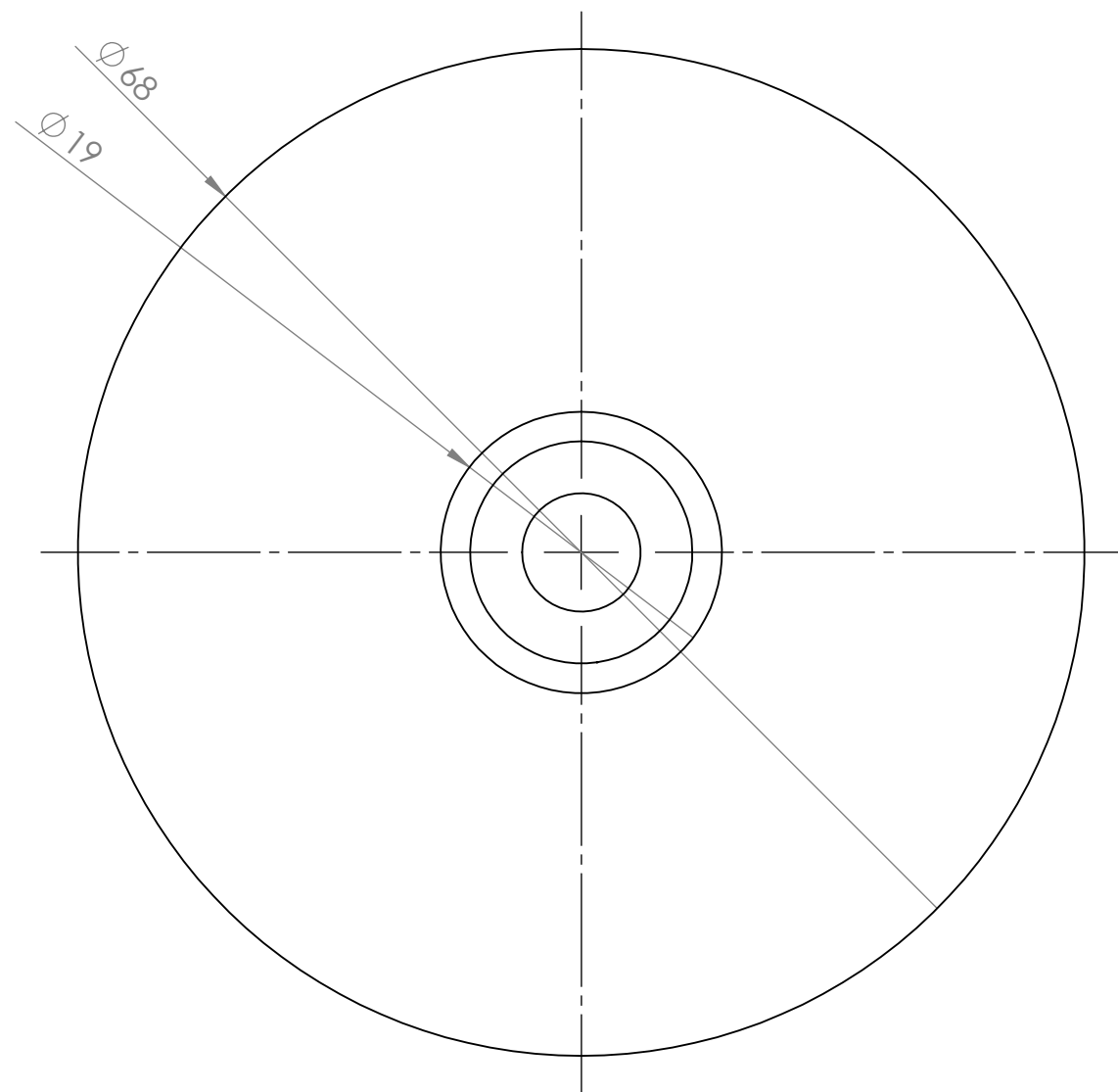
N.º DE DIBUJO

carcasa inferior_plano(2)

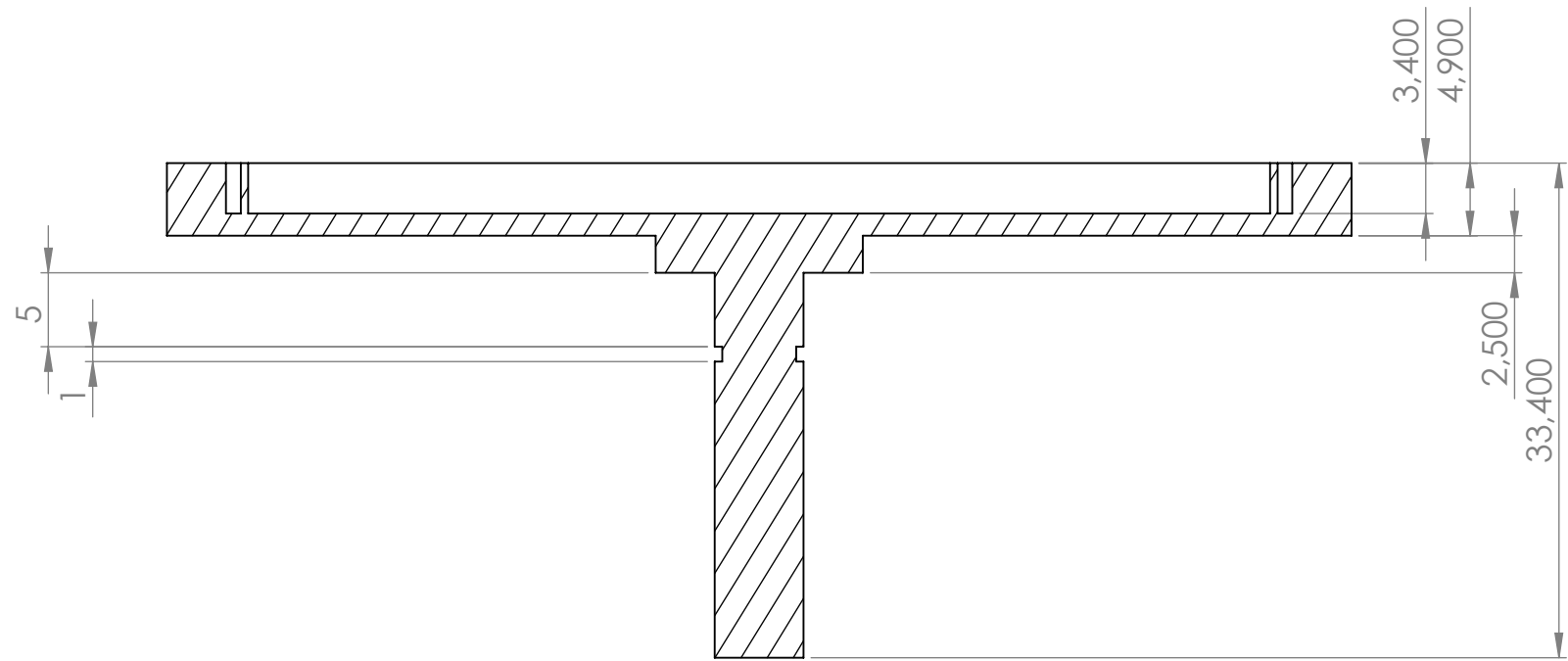
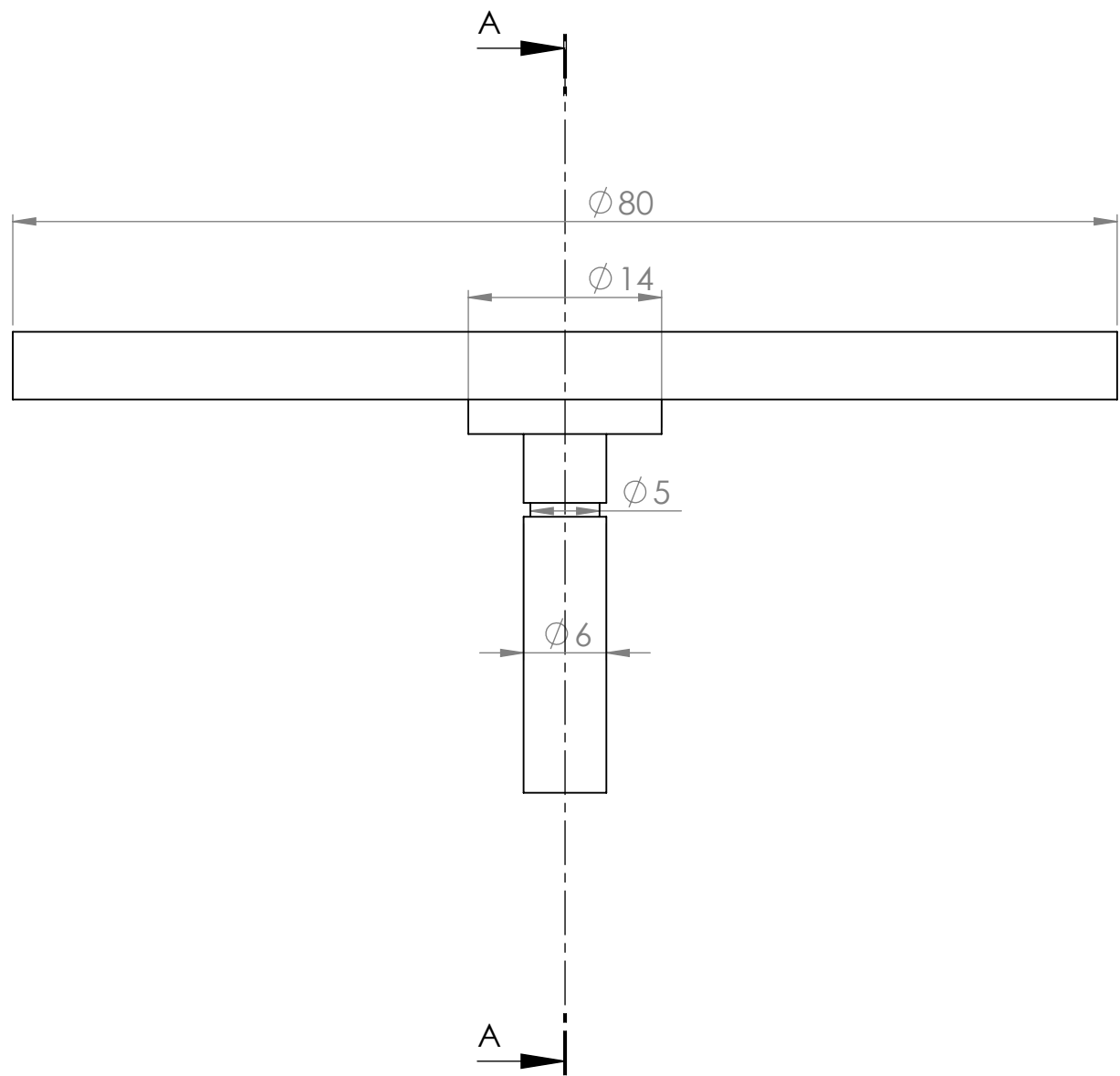
A2



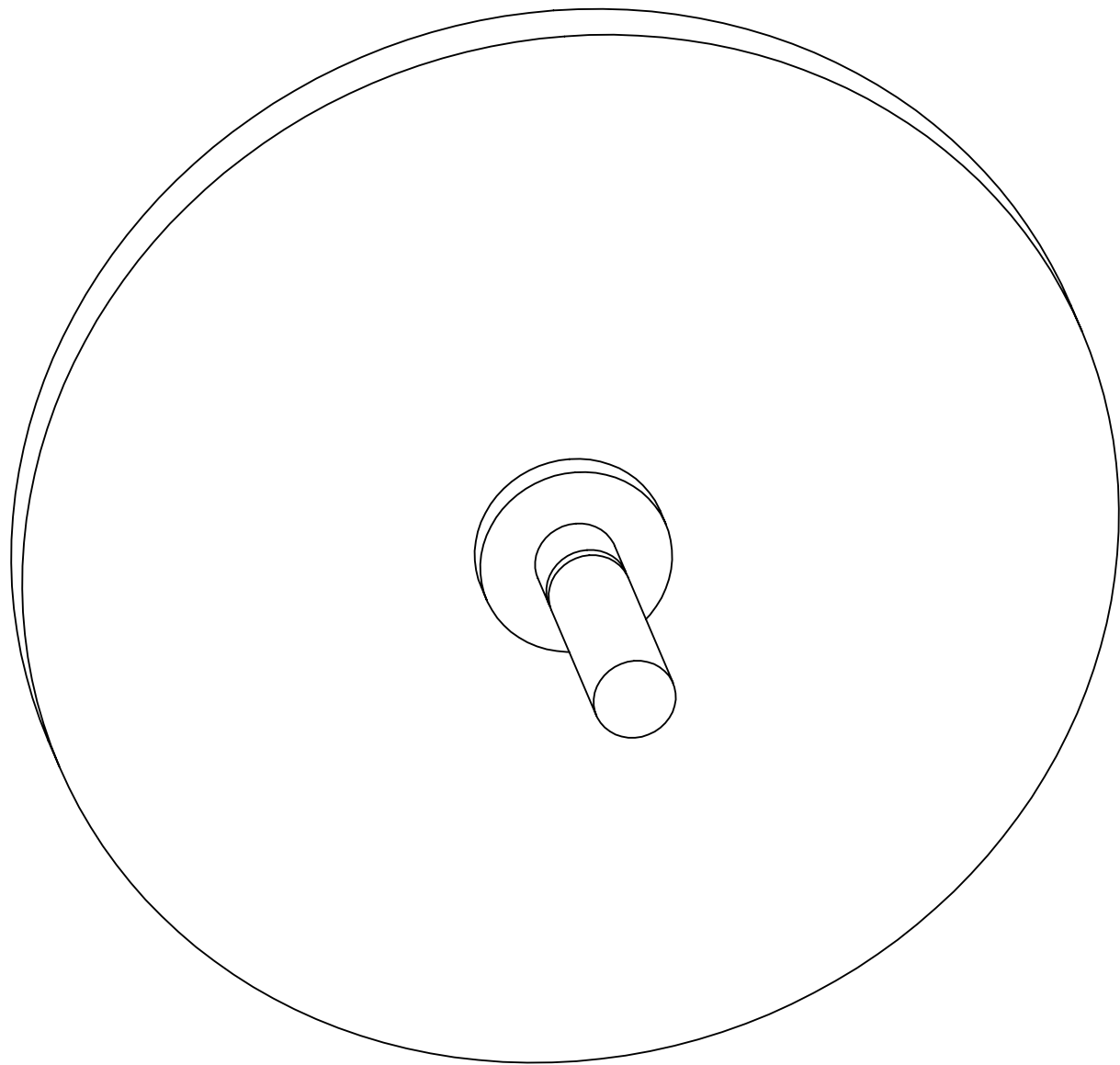
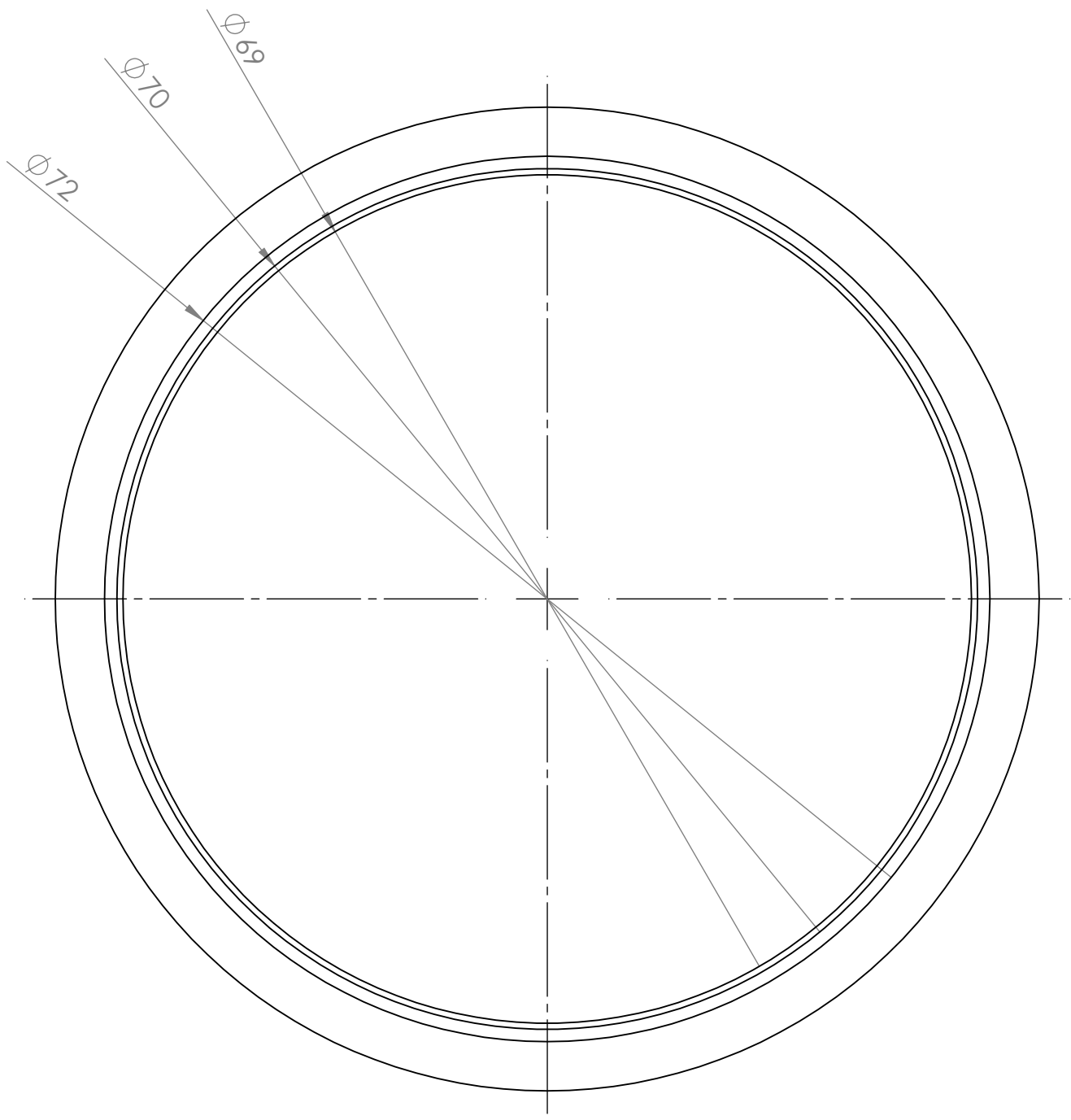
| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|----------|--|---------------------------------------|--|---------------------|--|---------------------------------|--|
| SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR: | | | | ACABADO: | | REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS | | NO CAMBIE LA ESCALA | | REVISIÓN | |
| DIBUJ. | | | | NOMBRE | | FIRMA | | FECHA | | TÍTULO: | |
| VERIF. | | | | | | | | | | | |
| APROB. | | | | | | | | | | | |
| FABR. | | | | | | | | | | | |
| CALID. | | | | | | | | MATERIAL: | | N° DE DIBUJO | |
| | | | | | | | | | | carcasa_sup_plano ^{A2} | |
| | | | | | | | | PESO: | | ESCALA:1:2 | |
| | | | | | | | | | | HOJA 1 DE 1 | |



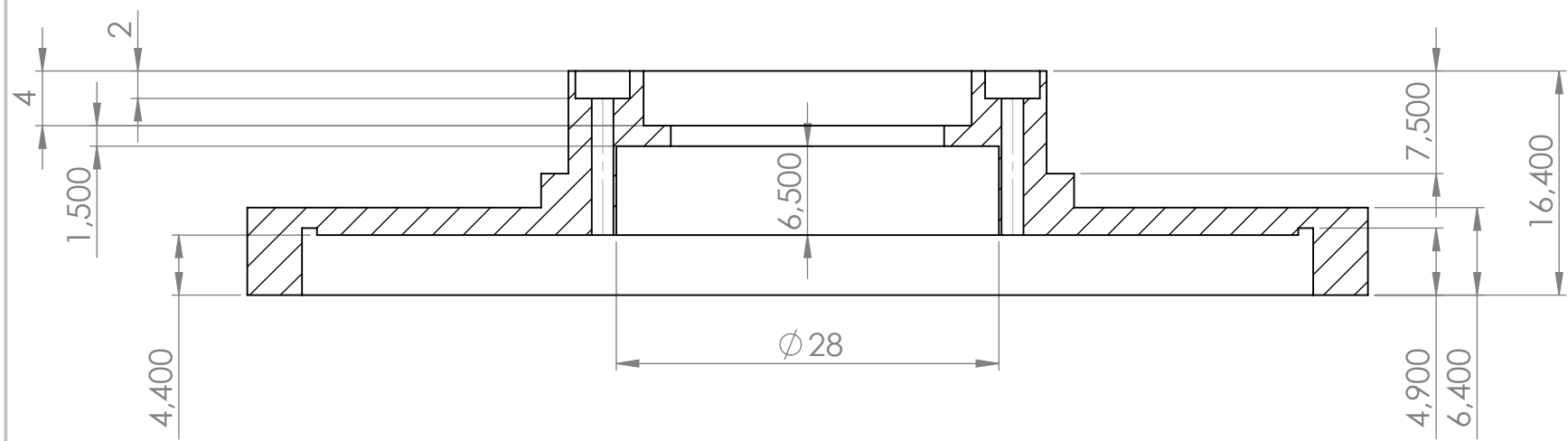
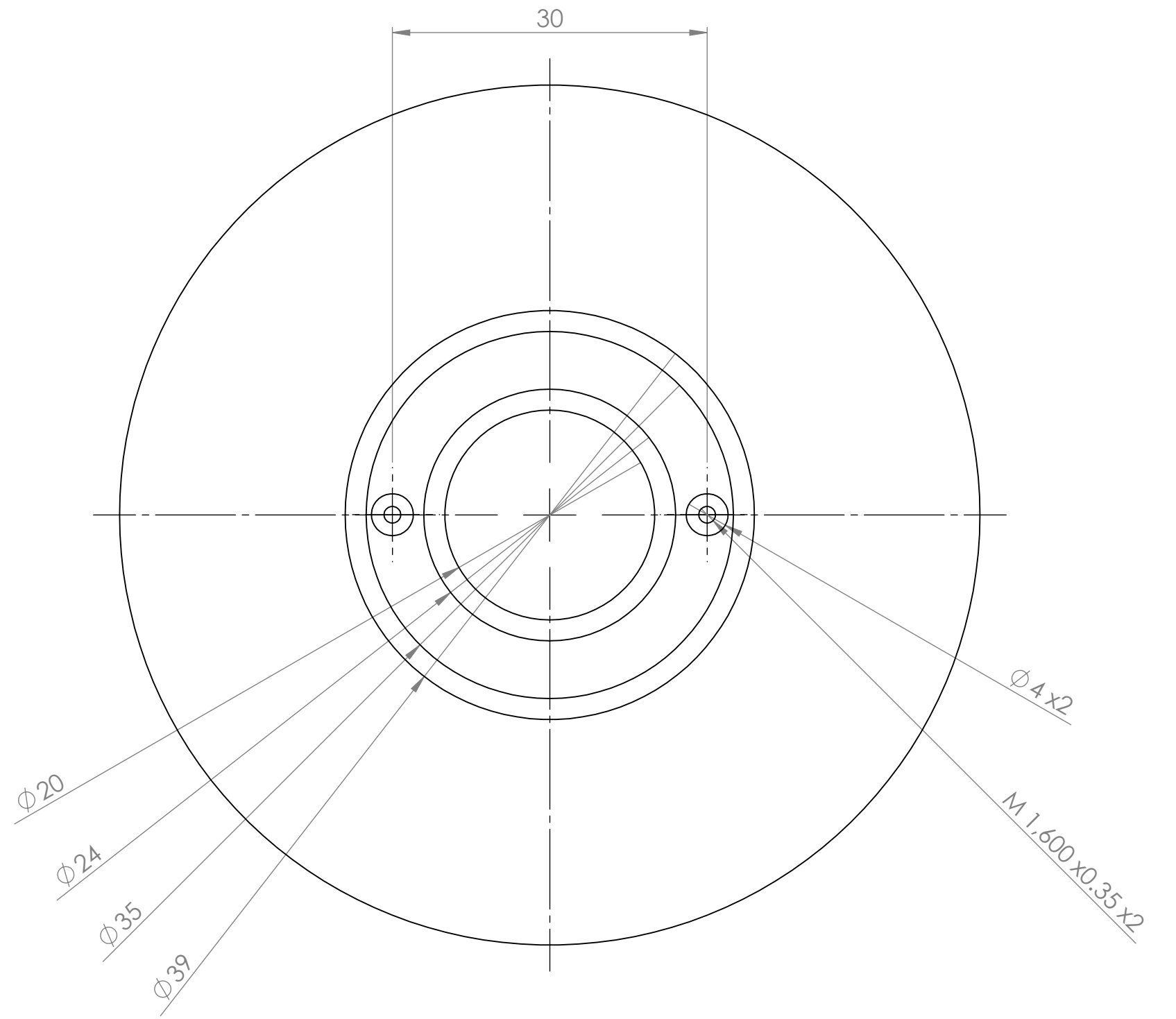
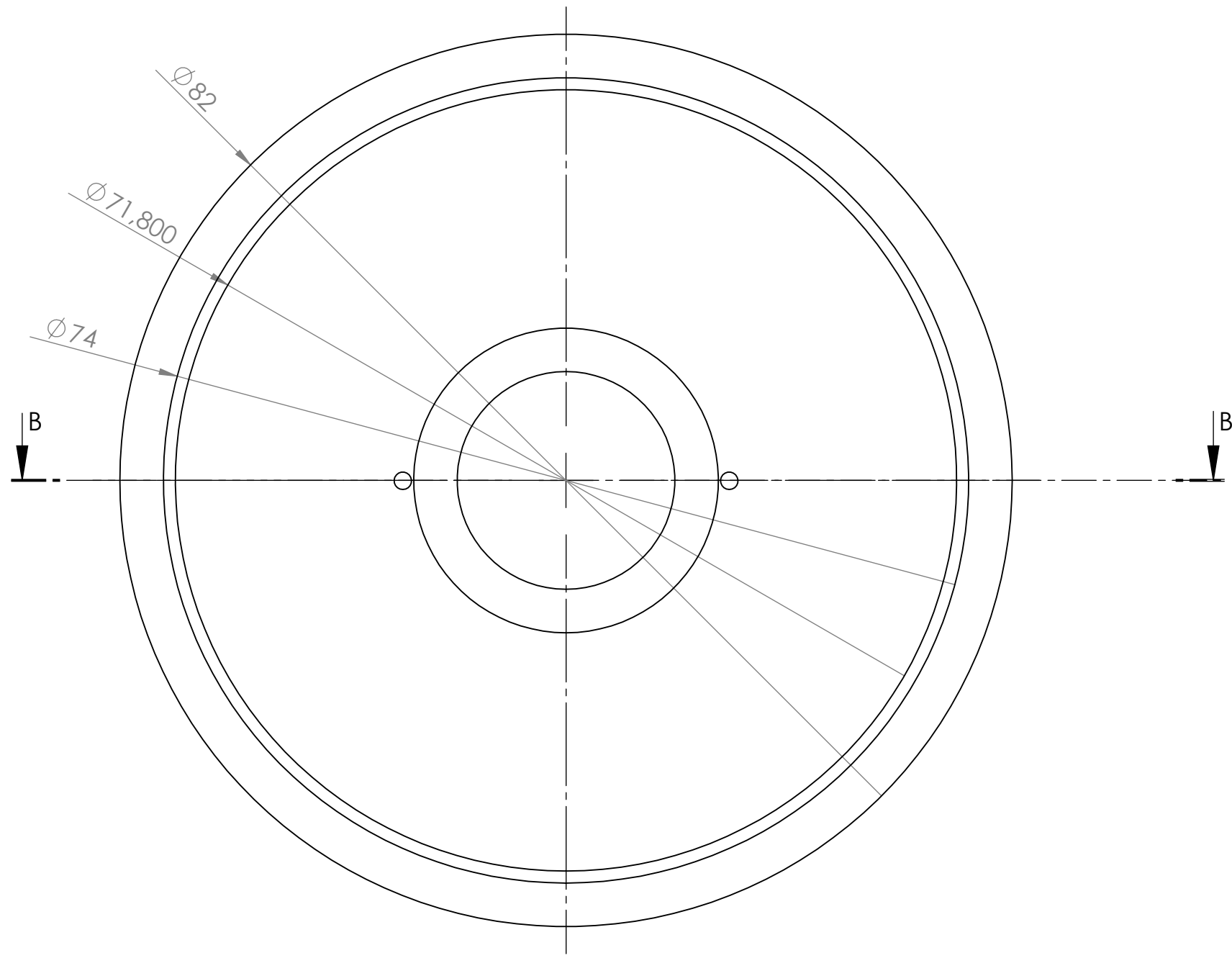
| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--------|--|----------|--|---------------------------------------|--|---------------------|--|-------------|--|
| SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR: | | | | ACABADO: | | REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS | | NO CAMBIE LA ESCALA | | REVISIÓN | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | NOMBRE | | FIRMA | | FECHA | | | | TÍTULO: | |
| DIBUJ. | | | | | | | | | | | |
| VERIF. | | | | | | | | | | | |
| APROB. | | | | | | | | | | | |
| FABR. | | | | | | | | | | | |
| CAUD. | | | | | | MATERIAL: | | N.º DE DIBUJO | | A2 | |
| | | | | | | | | eje de entrada2 | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | PESO: | | ESCALA:2:1 | | HOJA 1 DE 1 | |



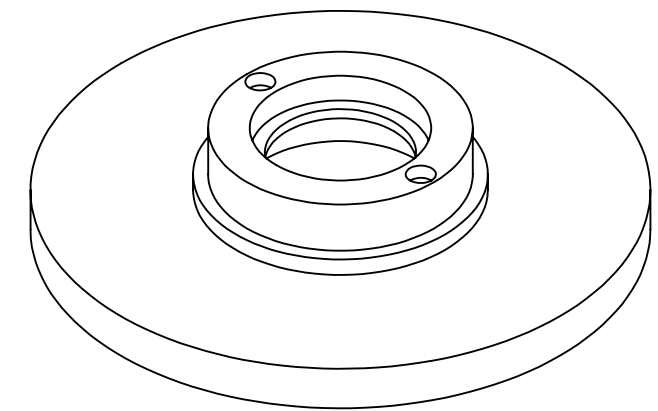
SECCIÓN A-A



| | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--------|-------|-------|----------|--|---------------------------------------|--|--|--|-------------|--|
| SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR: | | | | | ACABADO: | | REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS | | NO CAMBIE LA ESCALA | | REVISIÓN | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | NOMBRE | FIRMA | FECHA | | | | | TÍTULO: | | | |
| DIBUJ. | | | | | | | | | N.º DE DIBUJO <div>eje de salida3</div> | | | |
| VERIF. | | | | | | | | | | | | |
| APROB. | | | | | | | | | | | | |
| FABR. | | | | | | | | | | | | |
| CALID. | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | MATERIAL: | | A2 | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | PESO: | | ESCALA:2:1 | | HOJA 1 DE 1 | |



SECCIÓN B-B
ESCALA 2 : 1



| | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|----------|-------|---------------------------------------|--|---------------------|--|----------|
| SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR: | | | | ACABADO: | | REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS | | NO CAMBIE LA ESCALA | | REVISIÓN |
| | | | | NOMBRE | FIRMA | FECHA | | TÍTULO: | | |
| DIBUJ. | | | | | | | | | | |
| VERIF. | | | | | | | | | | |
| APROB. | | | | | | | | | | |
| FABR. | | | | | | | | | | |
| CALID. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | MATERIAL: | | N.º DE DIBUJO | | |
| | | | | | | PESO: | | ESCALA:1:1 | | |
| | | | | | | | | HOJA 1 DE 1 | | |

tapa eje de salida2^{A2}

ENGINEERING NOTE

Magnetic Circuit Design

Objectives:

- Design a low reluctance flux conduit (usually steel) to guide and focus magnetic flux into region of active magnetic fluid, e.g. the fluid gap in the MR fluid valve.
- Maximize the magnetic field energy in the fluid gap while minimizing the energy lost in the steel flux conduit and regions of non-working MR fluid and other areas.
- Maintain sufficient cross section of steel to keep H in the steel very low while minimizing total amount of steel in magnetic circuit.

Factors to consider:

- Nonlinear magnetic properties of MR fluid and steel.
- Fringing of magnetic flux.
- Possible losses at junctions and boundaries.
- Limits on voltage, current, and/or inductance.
- Possible inclusion of permanent magnets for fail-safe operation.
- Eddy currents.

Type of Steel

- Low carbon steel having a high magnetic permeability and saturation is desired.
- Ideally, the carbon content of the steel should be less than 0.15%.
- Acceptable grades include: AISI-12L14, AISI-1008, AISI-1010 and AISI-1018.

Magnetic Finite Element Analysis

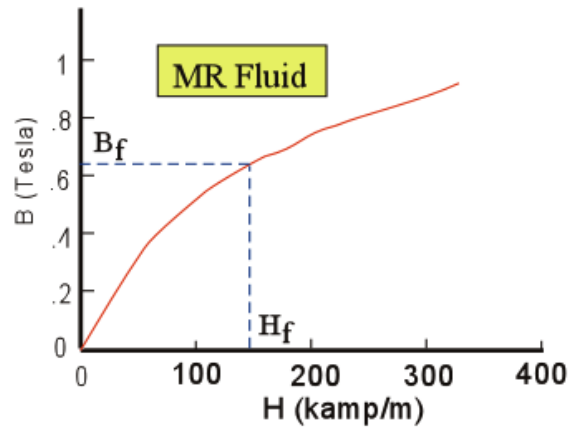
- Full optimization of the magnetic design can only be accomplished with the help of magnetic finite element software capable of explicitly treating nonlinear materials.
- Lord Corporation uses the 2D and 3D “Maxwell” software from Ansoft Corporation.
- Another good magnetic finite element program is “Magnet” from Infolytica.

Typical Design Process (Figs 1 and 2):

1. Select **operating point (H_f , B_f) in MR fluid** to give desired yield stress (τ).
 - Total magnetic flux is given by $\Phi = B_f * A_f$, where A_f is the effective pole area due to fringing. (See Fig. 3.)
2. Use principal of **Continuity of Magnetic Flux** to determine flux density B_s throughout flux conduit:
 - $\Phi_{\text{fluid}} = \Phi_{\text{steel1}} = \Phi_{\text{steel2}} = \dots$
3. Determine **operating point in steel**. (Note, this may not be the same at different places in the flux conduit if cross section varies.)
 - $B_s = \Phi_{\text{steel}} / A_s = B_f * A_f / A_s$
 - Determine H_s from BH curve for steel.
4. Use **Kirchoffs's Law for Magnetic Circuits** to determine necessary amp-turns (NI):
 - $NI = \oint H \cdot dl$
 - or
 - $NI = \sum H_i * L_i$
 - or
 - $NI = H_f * g + H_s * L$

Typical Design Process Steps

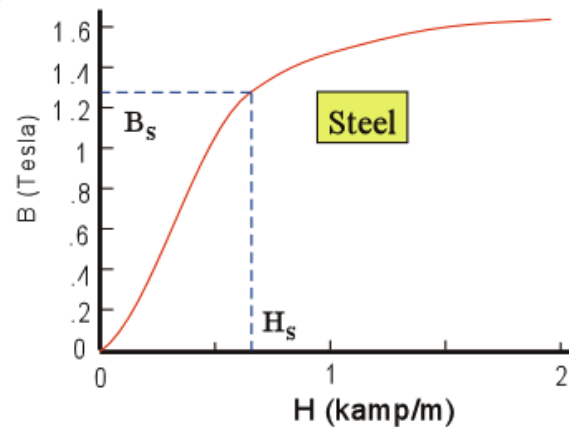
1 Operating Point in MR Fluid:



2 Continuity of Magnetic Flux: $\phi_{\text{gap}} = \phi_{\text{steel}}$

$$B_s = \frac{\phi}{A_s} = \frac{B_f A'_f}{A_s}$$

3 Operating Point in Steel:



4 "Kirchoff's" Law for Magnetic Magnetic Circuit:

$$N I = g H_f + L H_s$$

Figure 1 – Basic magnetic design process procedure.

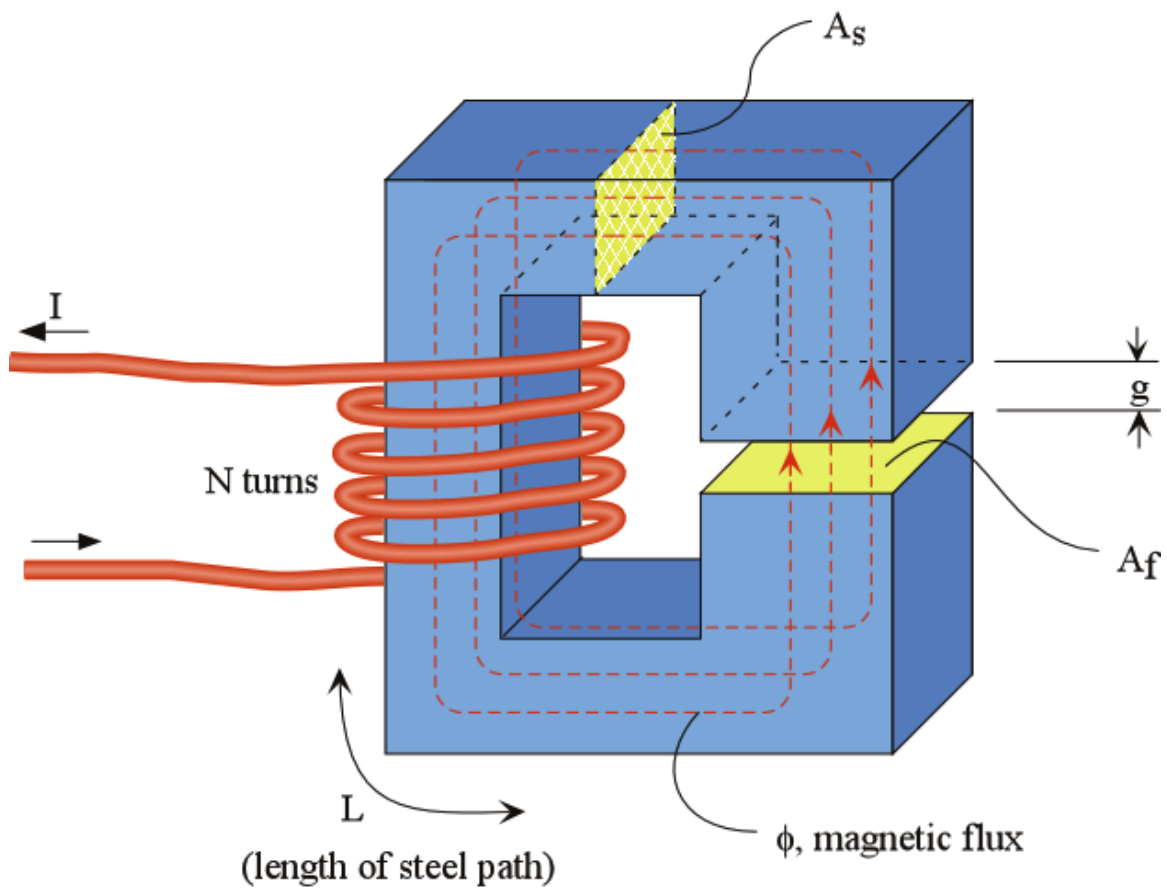


Figure 2 – Basic magnetic circuit

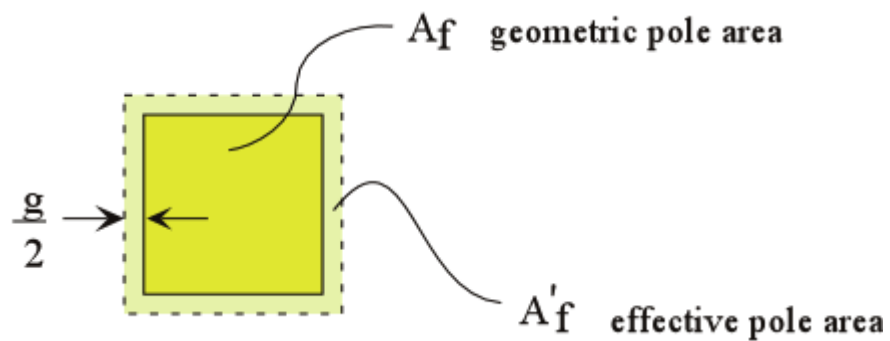


Figure 3 – Magnetic field fringing.